

## 9. 漂流物衝突シミュレーション

ここでは、非構造格子の解析として普及し始めている、粒子法による漂流物の解析を試行する。粒子法は、流体を粒子の集まりとして表す方法で、解析格子が不要なため水面の複雑な挙動を解析するのに有利である。その一方で、広域を対象とした場合、粒子の数が増えるため解析負荷が非常に大きくなる。また、漂流物のような移動する構造体やそれらの衝突については、既往の適用例が限られる。そこで、水中衝突試験の再現解析を実施し、解析手法の適用性や解析における課題について検討した。

### 9.1. シミュレーション手法と解析条件

#### (1)解析モデル

本解析では、粒子法として SPH 法を用いたオープンソースの解析コード DualSPHysic を使用した。本コードは、GPU に対応した高速計算を実現し、構造との連成解析や個別要素法の解析が可能なモデルである。また、最新リリース(2019年4月)により、入流出境界に対応も可能となる。

#### (2)解析領域

水理試験の対象地形は図-9.1.1 に示す直立護岸の海底地形とし、陸上部には堤体を設置した。堤体高は 0.6 m、設置位置は護岸から 0.625m 陸側とし、造波境界、直線部、単純勾配斜面、直線部、直立護岸、遡上区間の一連の水路をモデル化した。

また、シミュレーションとの境界においては、汀線より 6.75m 沖側の B1 地点を境界として計算した(図-9.1.1, 表-9.1.1 参照)。横断方向については計算時間節約のために幅 0.2m とした。

#### (3)計算の粒子サイズ

試験水路の形状と漂流物として船舶型を適切に表現できるように、粒子サイズを 0.005m として作成した。

#### (4)初期条件

シミュレーションの初期条件は、水理試験の静水状態(沖合直線部水深 0.6m、B1 地点直線部水深 0.15m)とした。

#### (5)入力津波条件

シミュレーションの入力波は、水理試験に用いた入力波 We20 の波形であり、具体的には、波検定により得られた水位時系列(3回の試行試験の平均)と水中衝突試験で得られた流速時系列(TypeA, 初期位置 0.1m, 1回目)であり、B1 点における計測された時系列データ(図-9.1.2)である。

#### (6)漂流物条件

漂流物の形状については、水理試験で用いた TypeA, TypeB, TypeC, TypeD の4ケースの内、TypeA, TypeC, TypeD の3ケース(図-9.1.3)とした。漂流物の重さは水理試験に合わせて、TypeA, TypeC の重さは約 150g, TypeD は約 30g とした。なお、シミュレーションの粒径 0.005m で表現できない分解能のサイズは、赤字に記した大きさとした。

#### (7)時間条件

再現計算時間は、水理試験において堤体に衝突する 7 秒後から 12 秒までの 5 秒間とした。また、計算間隔については安定計算にするためクーラン数 0.2 とした。

上述した解析条件をもとに、水理試験を対象に、数値シミュレーション解析を実施し、解析手法の適用性を確認した。

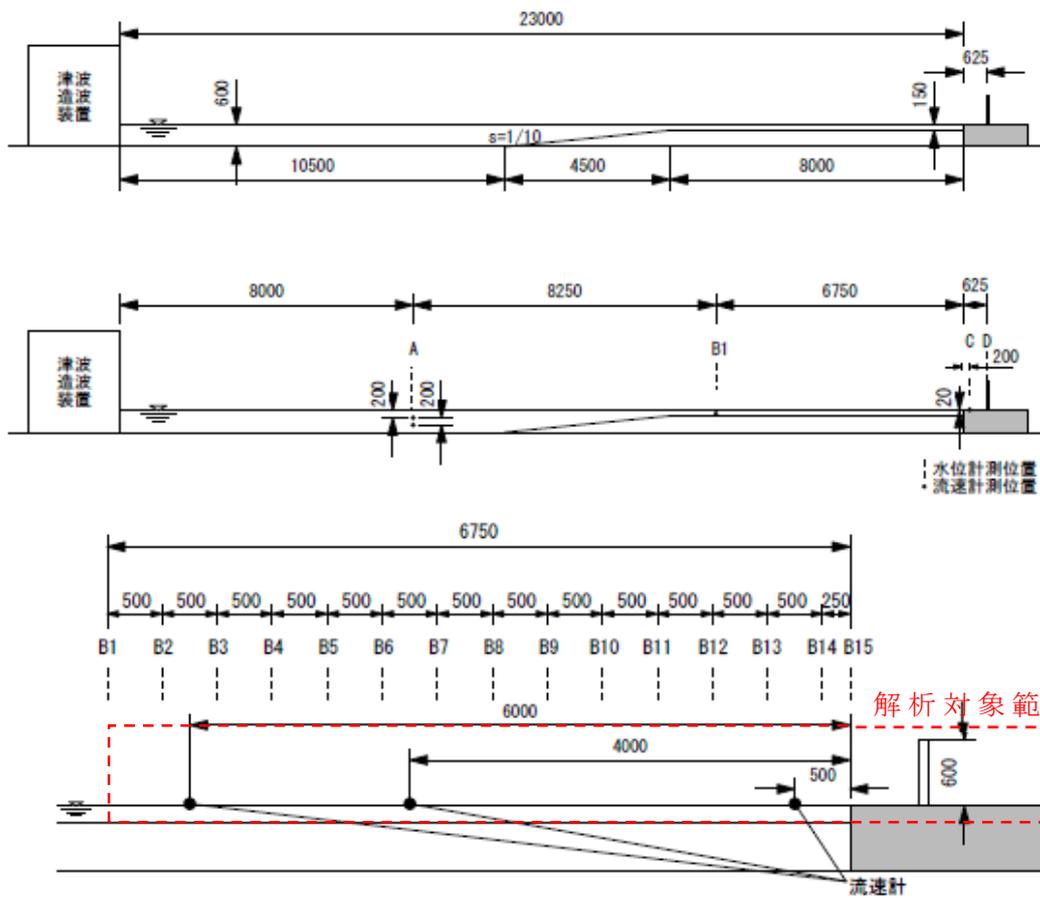


図- 9.1.1 水理試験の地形および堤体条件（断面図，単位：mm）

表- 9.1.1 シミュレーション条件

境界位置	堤体	粒子サイズ	船舶模型
汀線より 6.75m 沖側 水位, 流速	堤体高さ 0.06m	粒径 0.005m	A
	汀線より 0.625m 陸側		C
			D

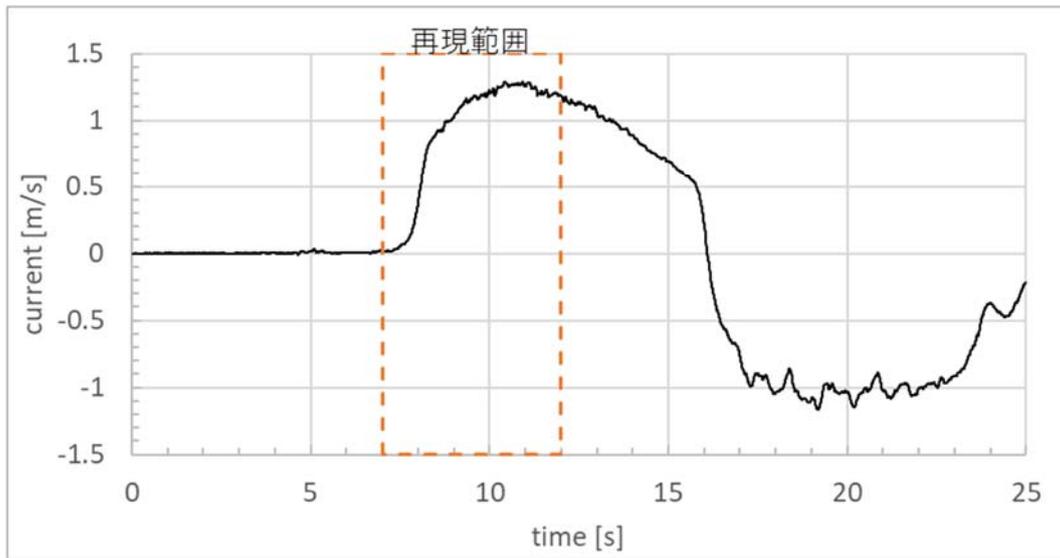
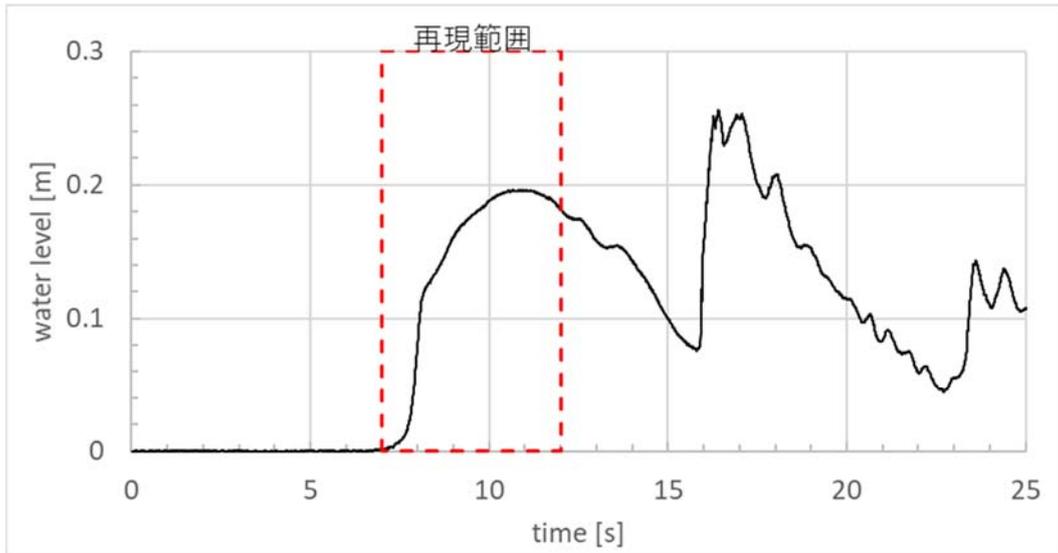
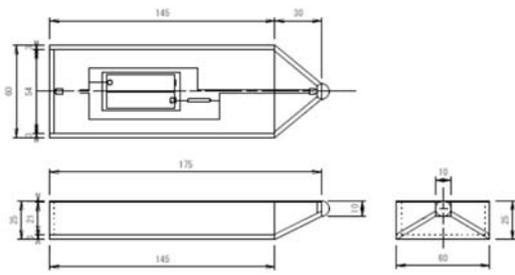
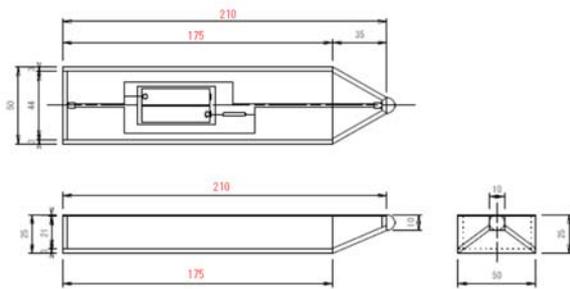


図- 9.1.2 境界条件：波 We20（計測位置点 B1 の水位と流速）

Type A



Type C



Type D

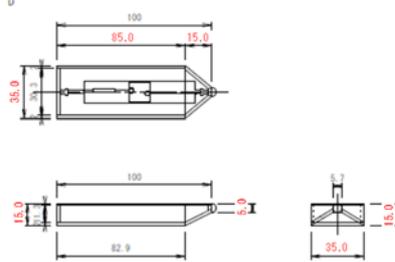


図- 9.1.3 シミュレーションの漂流物条件 (断面図, 単位 : mm)

## 9.2. 解析ケース

直立護岸地形を対象に、9 ケースの解析を実施した。解析条件のケース一覧を表-9.2.1 に示す。

表-9.2.1 シミュレーション解析ケース一覧

ケース名	波形	堤体位置	漂流物	漂流物位置
直立護岸				
F-We20-A-05	We20	0.625 m	TypeA	0.5m
F-We20-A-20				2.0m
F-We20-A-35				3.5m
F-We20-C-05			TypeC	0.5m
F-We20-C-20				2.0m
F-We20-C-35				3.5m
F-We20-D-05			TypeD	0.5m
F-We20-D-20				2.0m
F-We20-D-35				3.5m

## 9.3. 解析結果

### 9.3.1. 水位の時系列波形

図- 9.3.1 に、B1～B15, C, D 地点での水位時系列波形図を示す。ここでは、漂流物 TypeA, 漂流物初期位置 0.5m のケースを示した。解析結果 (F-We20-A-05) を赤線, 試験結果 (F-We20-0-0-a, F-We20-A-05-01) を黒線で示した。

シミュレーション解析結果は、試験結果に比較して若干波速が大きい傾向にあるものの、その波形は水理試験の結果を精度良く再現していると言える。水位は、堤体前面での水位に若干の違いがあるものの、水位変動の違いはわずかであることが分かる。

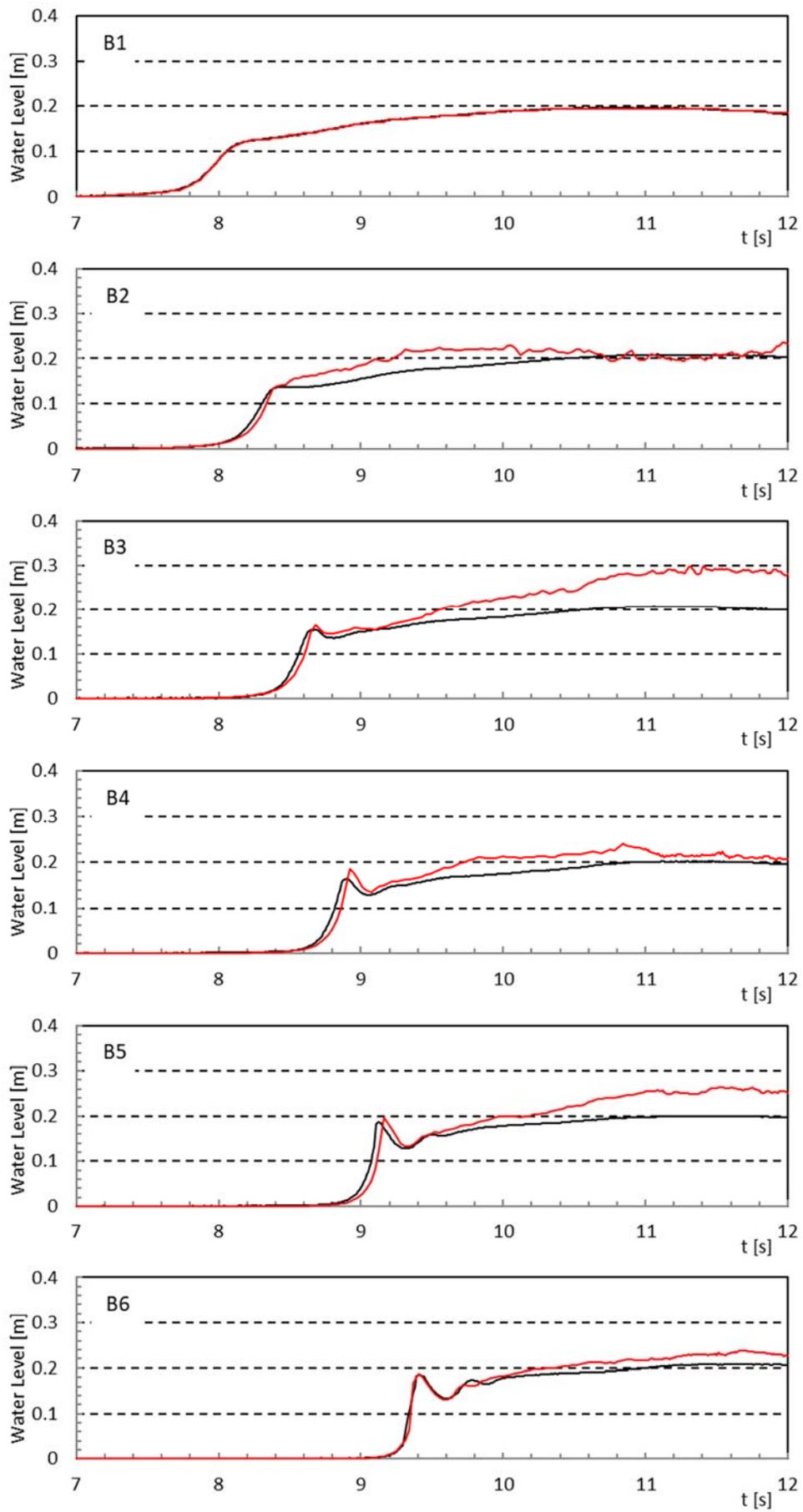


图- 9.3.1 水位時系列 (F-We20-A-05) (1/3)

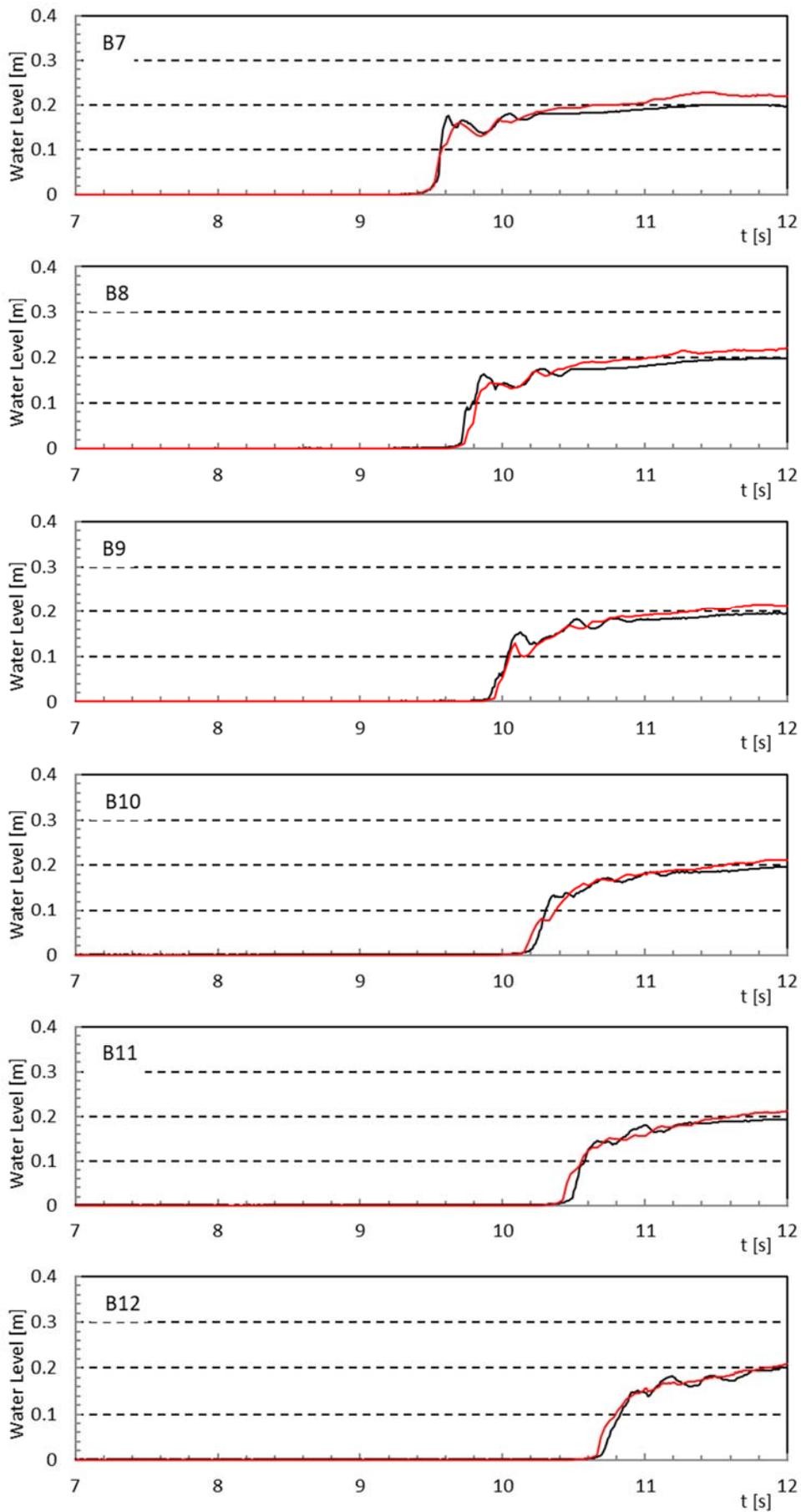


图- 9.3.1 水位時系列 (F-We20-A-05) (2/3)

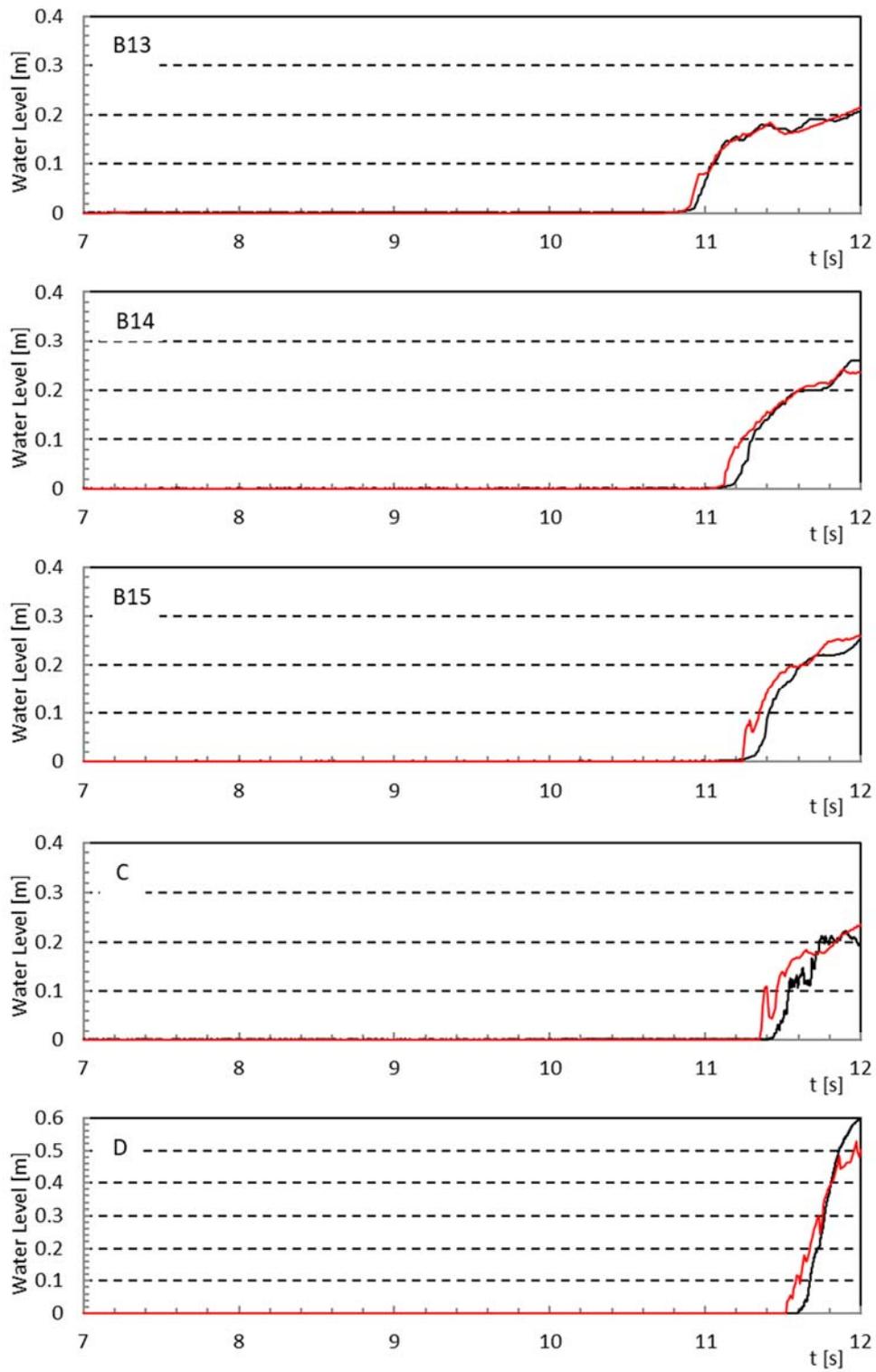


図- 9.3.1 水位時系列 (F-We20-A-05) (3/3)

### 9.3.2. 流速の時系列波形

図-9.3.2 に、B1, B2\_3, B6\_7, B13\_14, C 地点での流速時系列図をそれぞれ示す。ここでは、堤体位置 0m, 漂流物 A, 漂流物初期位置 0.5m のケースを示した。なお、解析結果を赤線、試験結果を黒線で示した。

シミュレーション解析結果は、境界付近 B2\_3 の流速は、境界の影響により差異が見られるが、水位の解析結果と同様、水理試験の結果を精度良く再現していると言える。

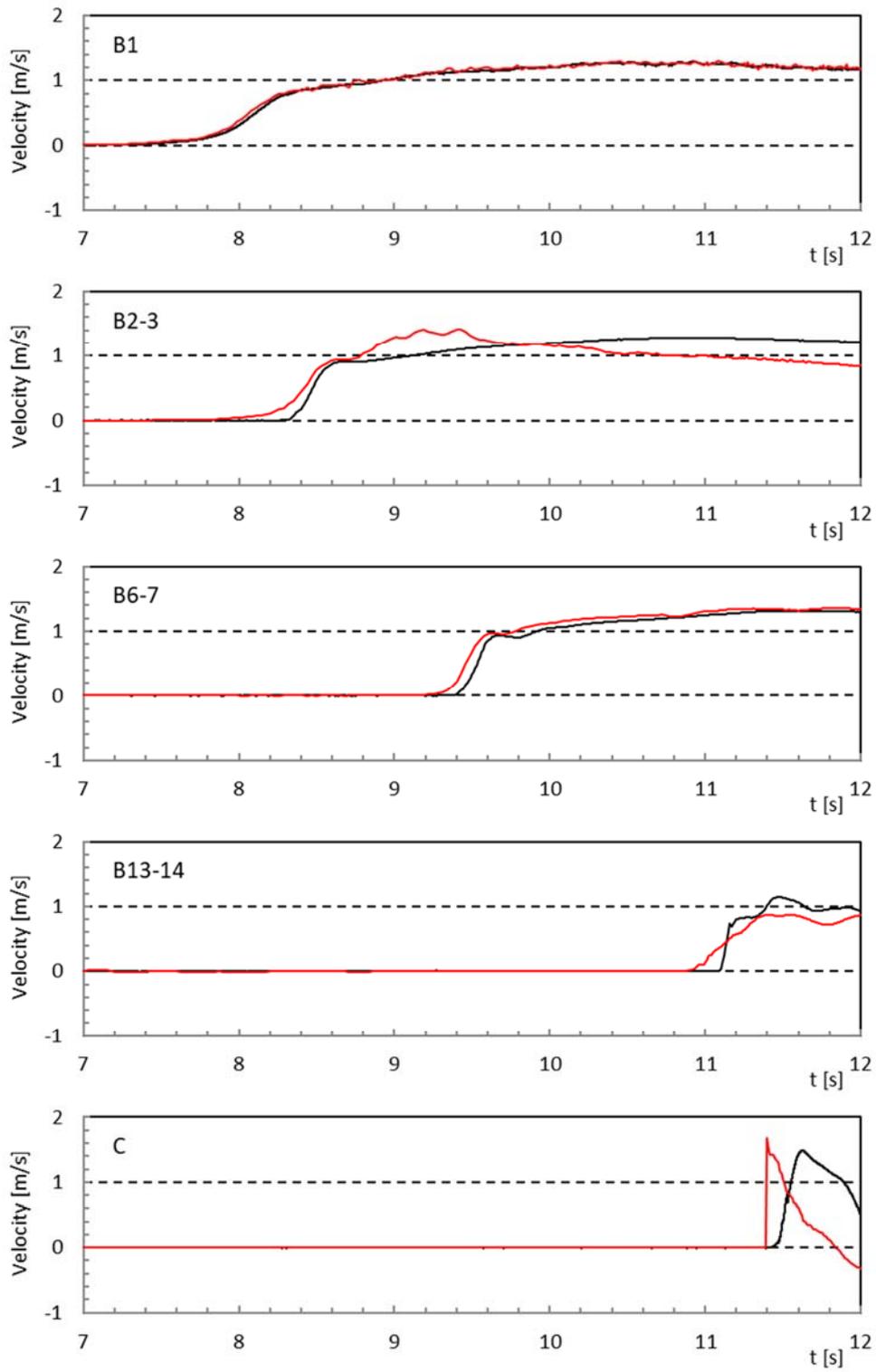


図- 9.3.2 流速時系列 (F-We20-A-05)

### 9.3.3. 波圧の時系列波形

図-9.3.3～図-9.3.11は、堤体前面で計測された圧力の時系列波形図をそれぞれ示した図であり、解析結果を赤線、試験結果を黒線で示す。P1～P10は、堤体下部から P1:2.5cm, P2:7.5cm, P3:12.5cm, P4:17.5cm, P5:22.5cm, P7:32.5cm, P9:42.5cm, P10:52.5cm の各地点の圧力を示している。なお、解析結果の波圧は粒子間隔 5mm 四方より求めたものであり、Force は波圧から単位幅当たりの波力を算出したものである。

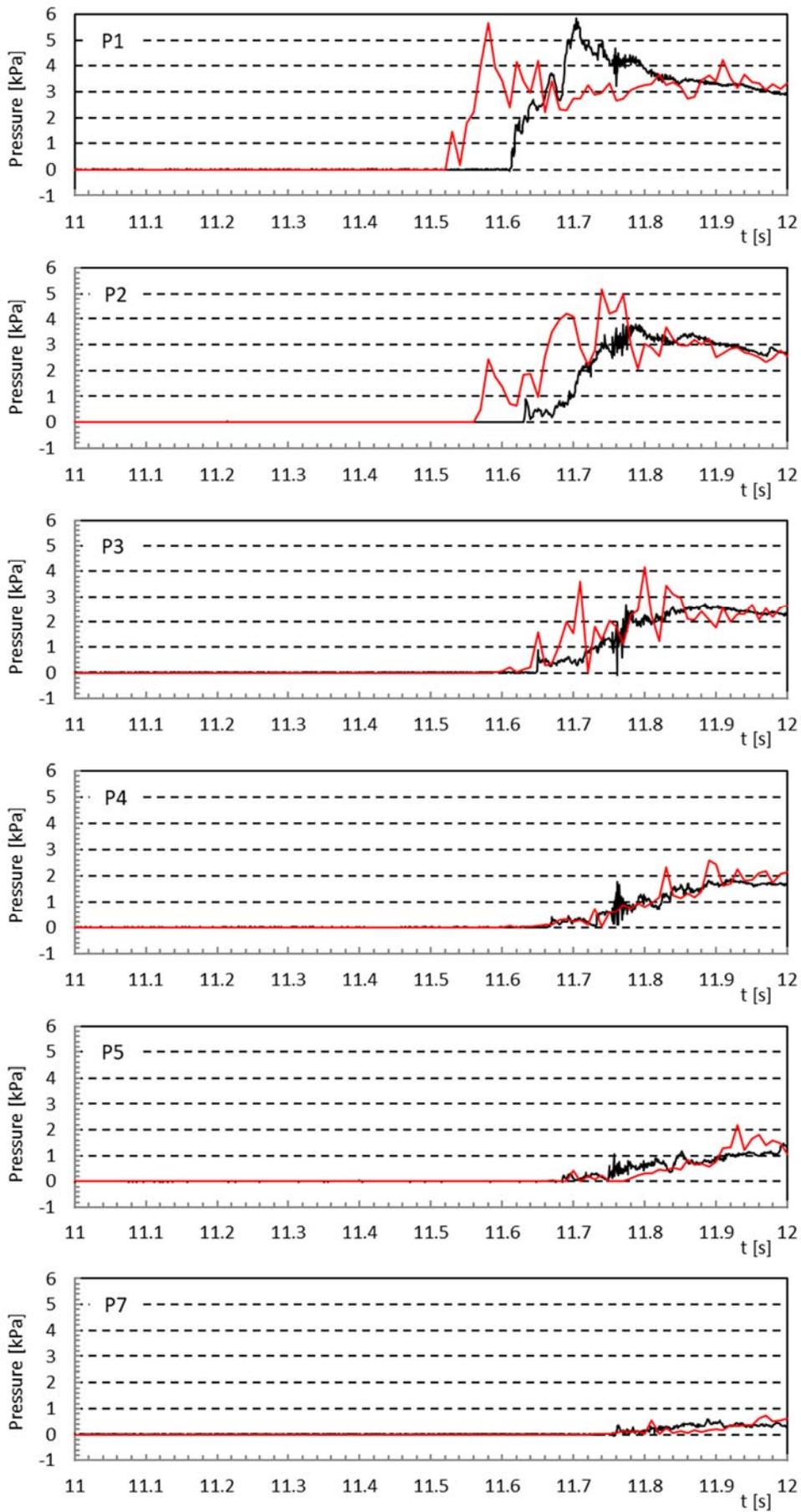


图- 9.3.3 波压時系列波形 (漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, F-We20-A-05) (1/2)

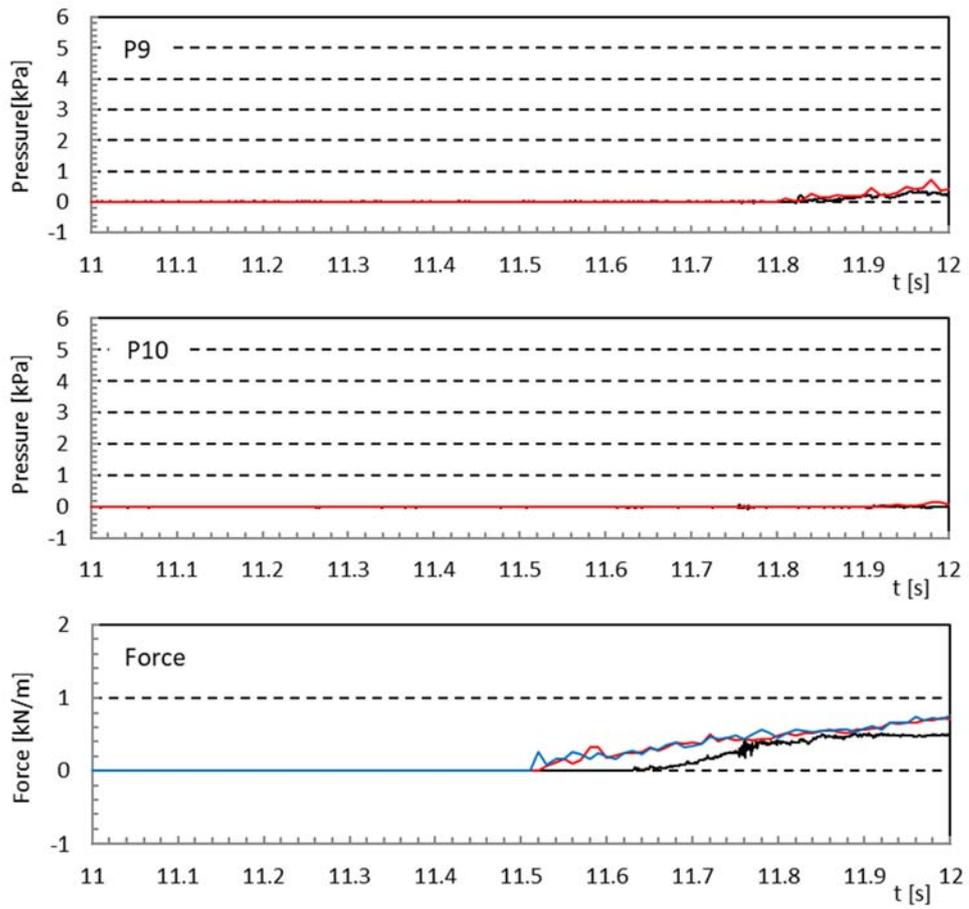


图- 9.3.3 波压時系列波形（漂流物 TypeA, 初期位置 0.5m, F-We20-A-05） (2/2)

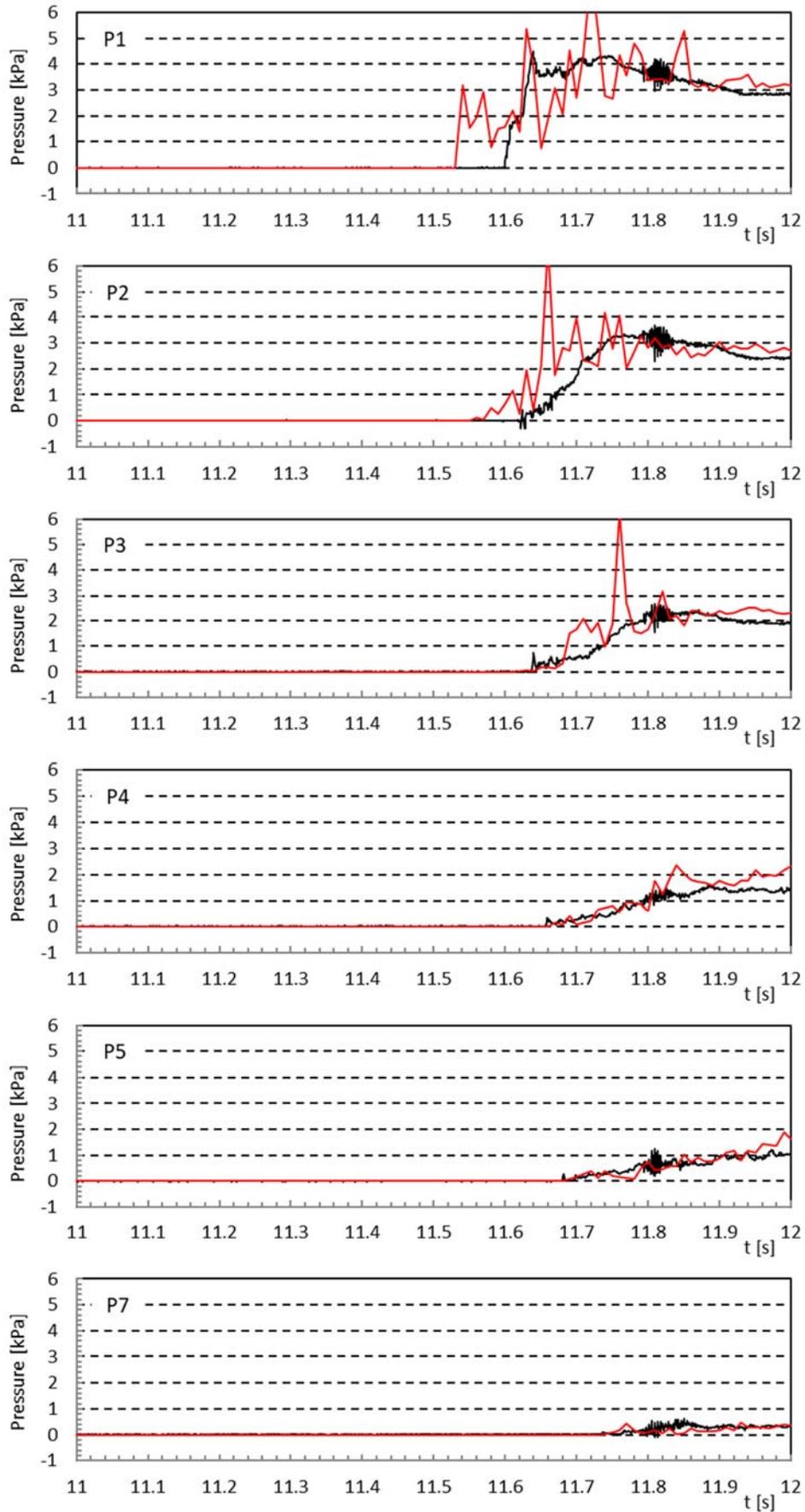


図- 9.3.4 波圧時系列波形 (漂流物 TypeA, 初期位置 2.0m, F-We20-A-20) (1/2)

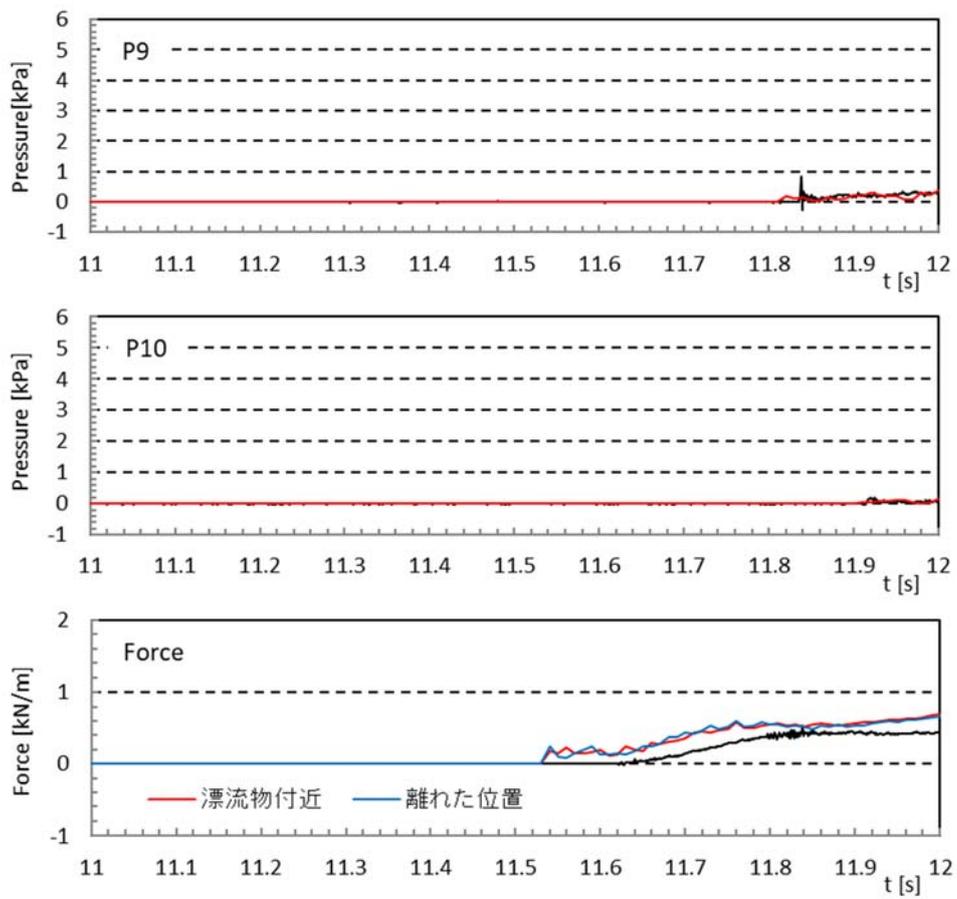


図- 9.3.4 波圧時系列波形 (漂流物 TypeA, 初期位置 2.0m, F-We20-A-20) (2/2)

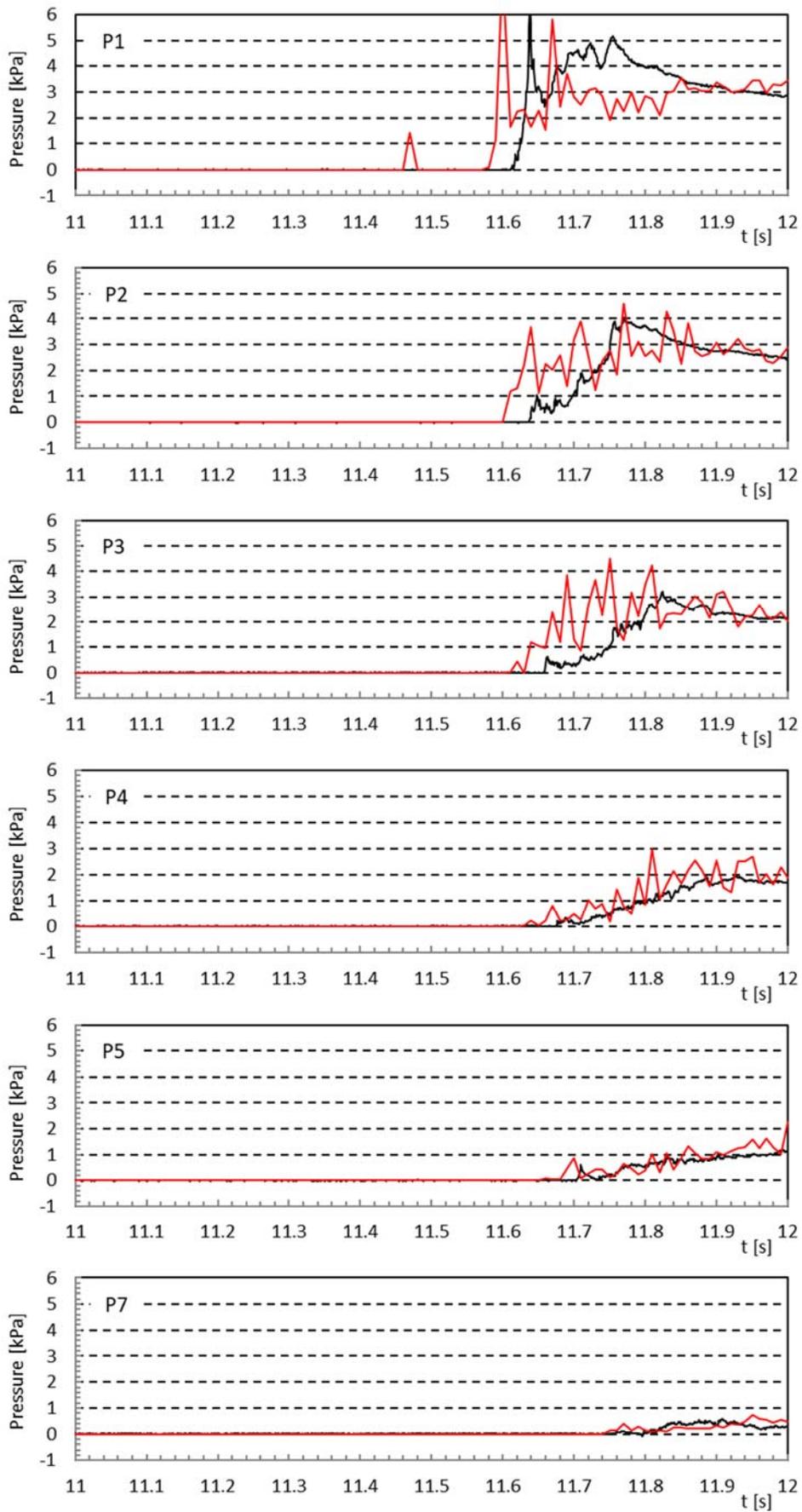


图- 9.3.5 波压時系列波形 (漂流物 TypeA, 初期位置 3.5m, F-We20-A-35) (1/2)

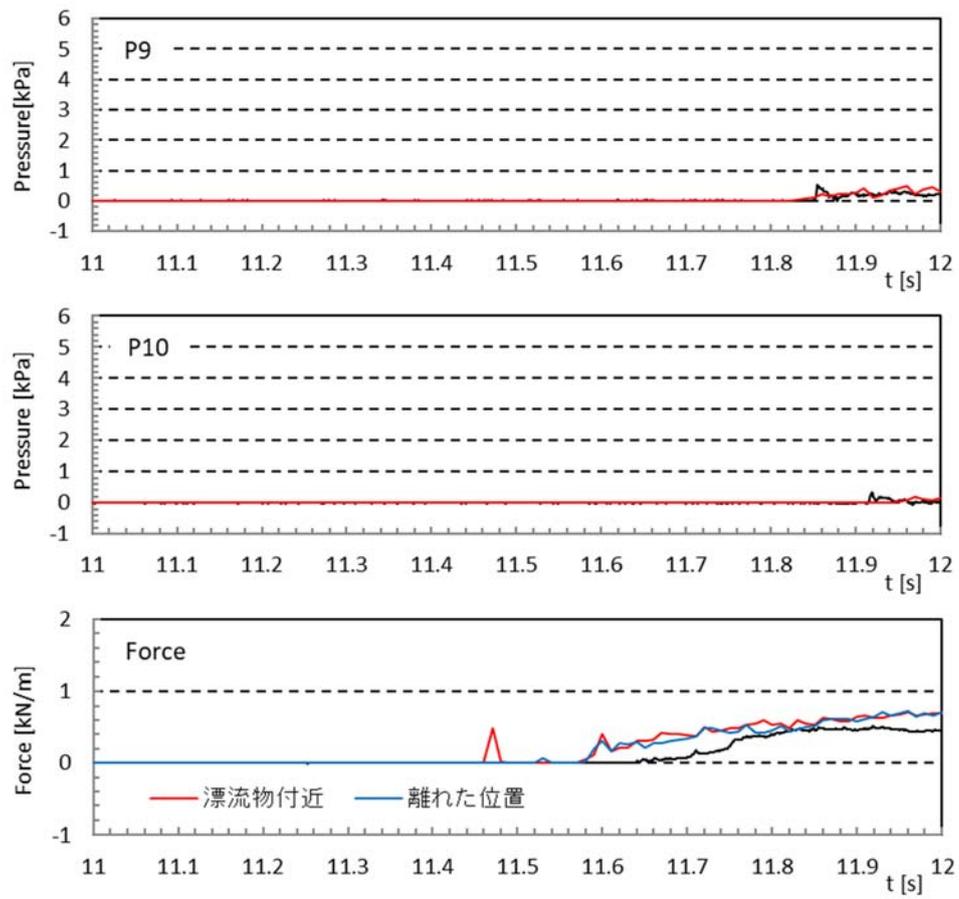


図- 9.3.5 波圧時系列波形（漂流物 TypeA, 初期位置 3.5m, F-We20-A-35）(2/2)

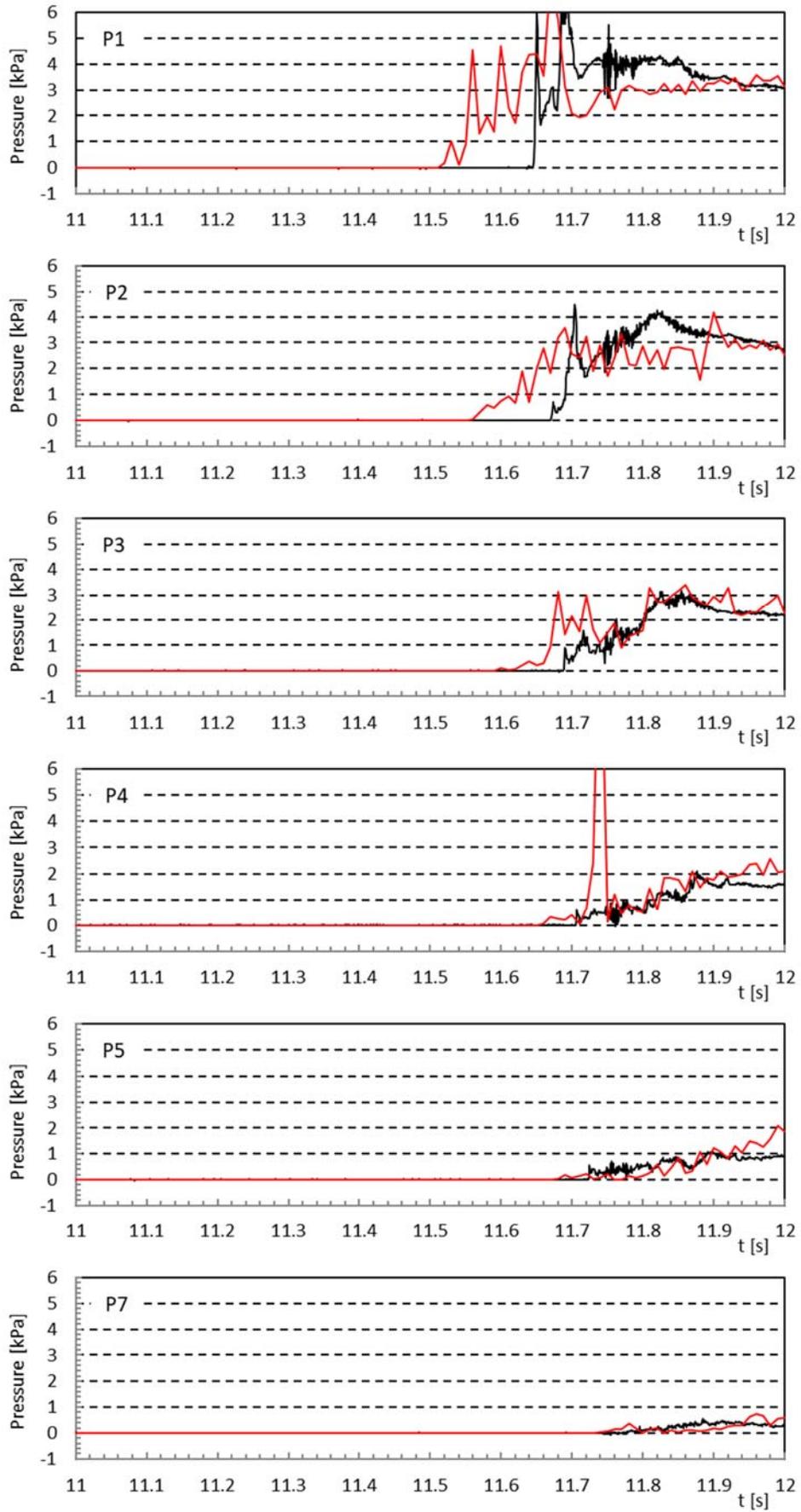


图- 9.3.6 波压时系列波形 (漂流物 TypeC, 初期位置 0.5m, F-We20-C-05) (1/2)

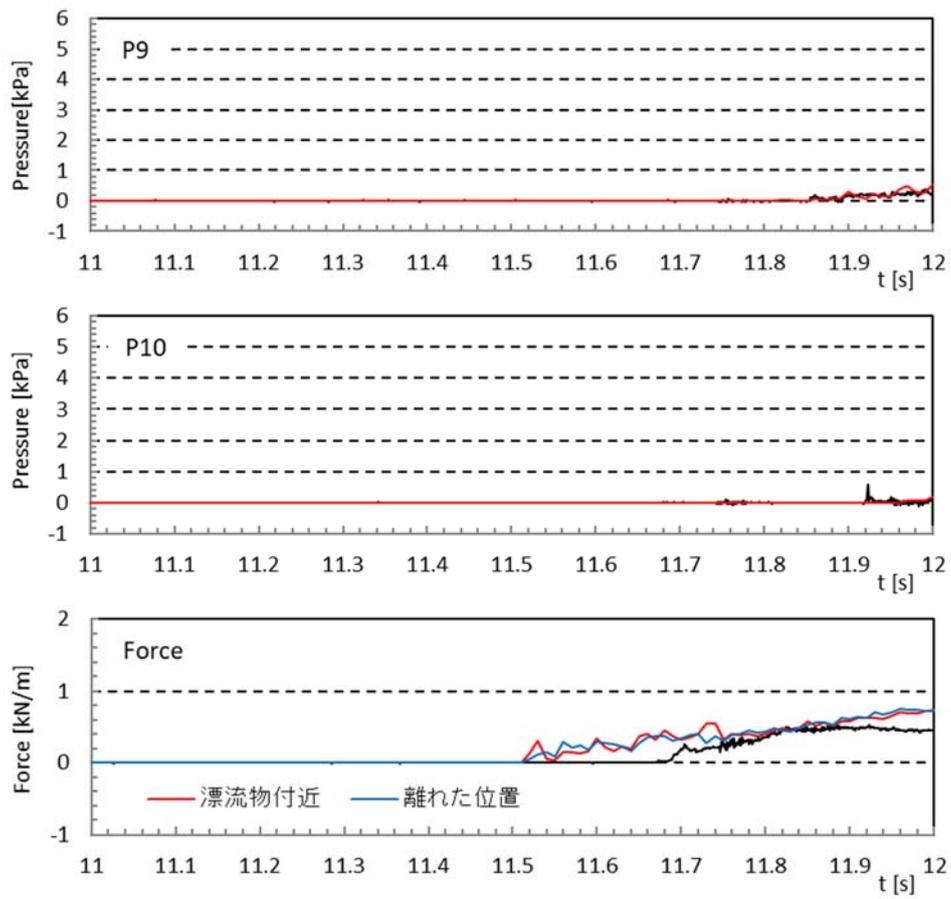


図- 9.3.6 波圧時系列波形（漂流物 TypeC, 初期位置 0.5m, F-We20-C-05） (2/2)

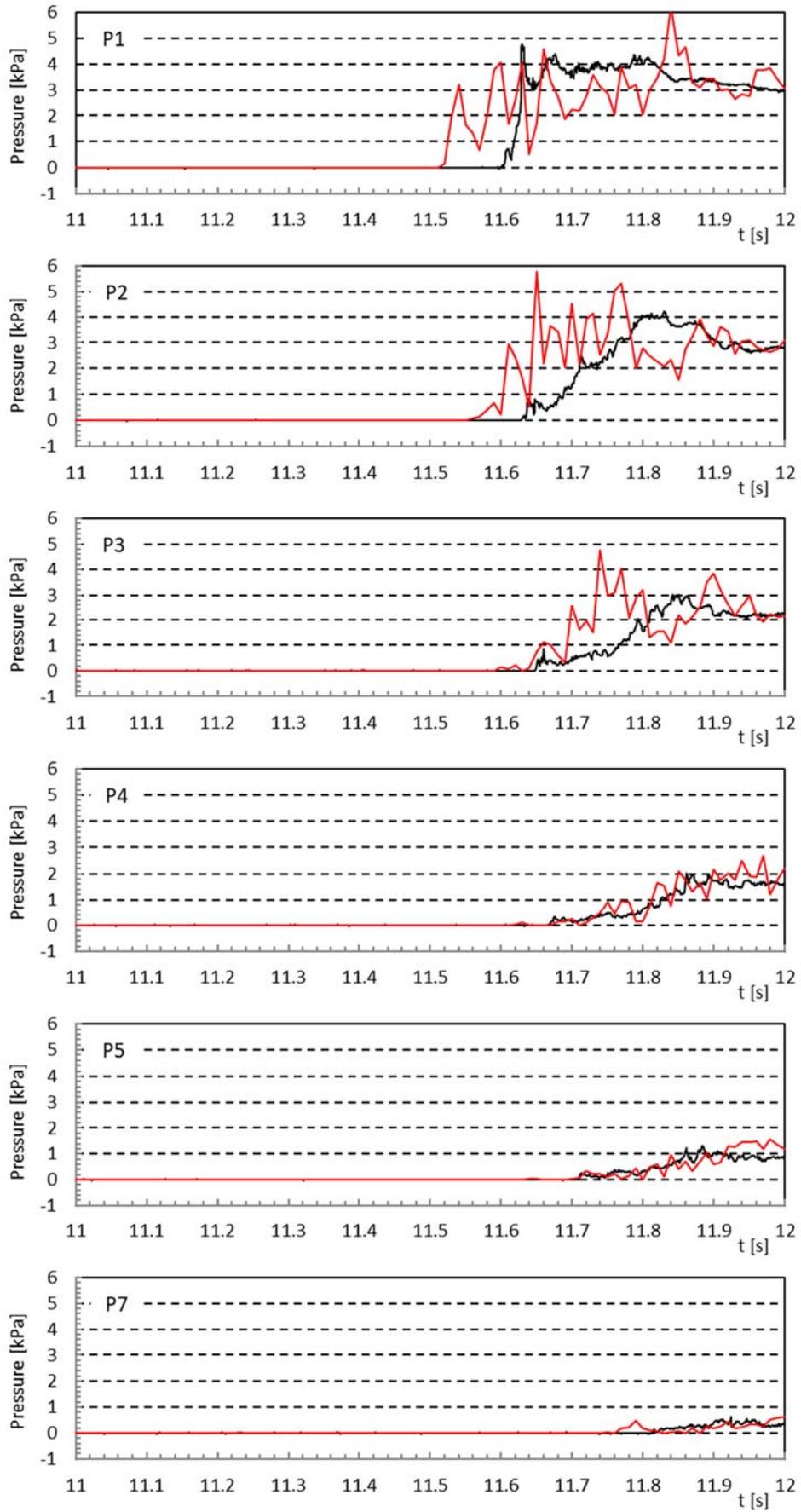


图- 9.3.7 波压时系列波形 (漂流物 TypeC, 初期位置 2.0m, F-We20-C-20) (1/2)

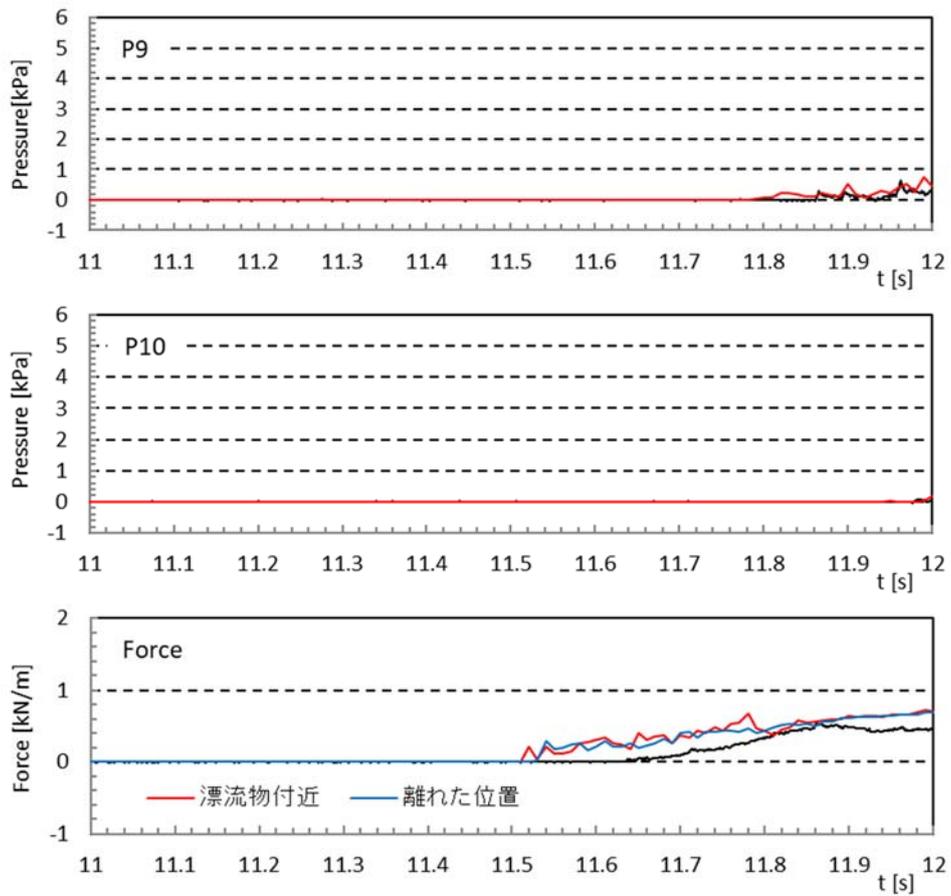


図- 9.3.7 波圧時系列波形（漂流物 TypeC, 初期位置 2.0m, F-We20-C-20）(2/2)

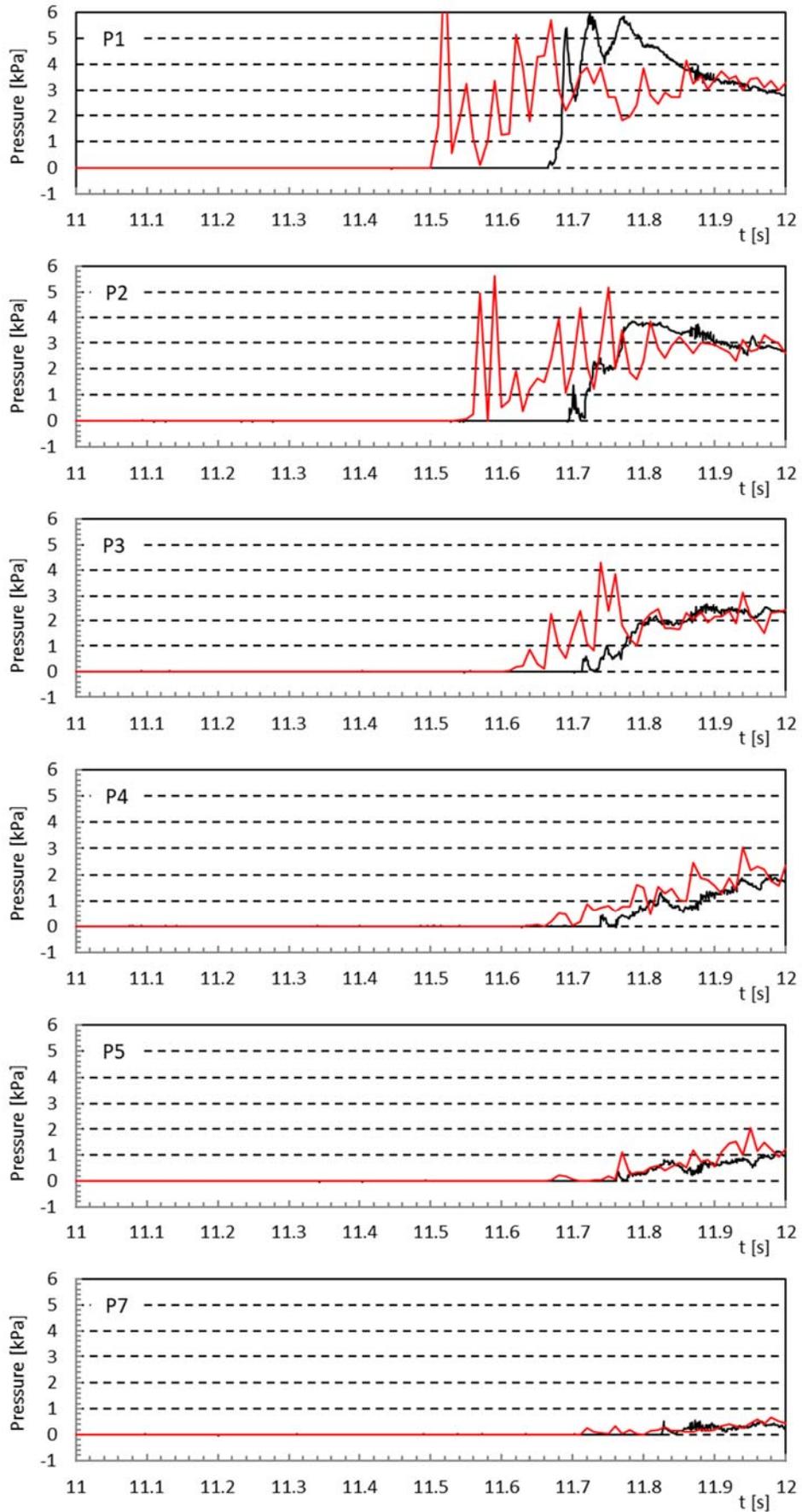


图- 9.3.8 波压时系列波形 (漂流物 TypeC, 初期位置 3.5m, F-We20-C-35) (1/2)

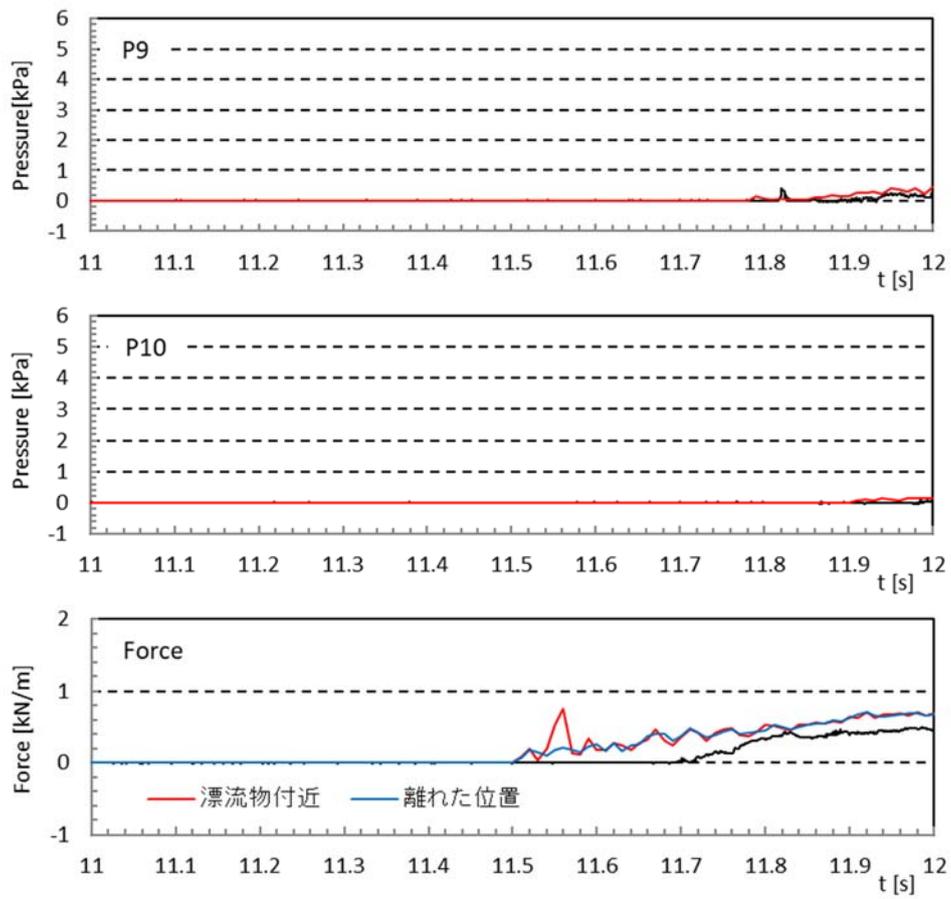


図- 9.3.8 波圧時系列波形（漂流物 TypeC, 初期位置 3.5m, F-We20-C-35）(2/2)

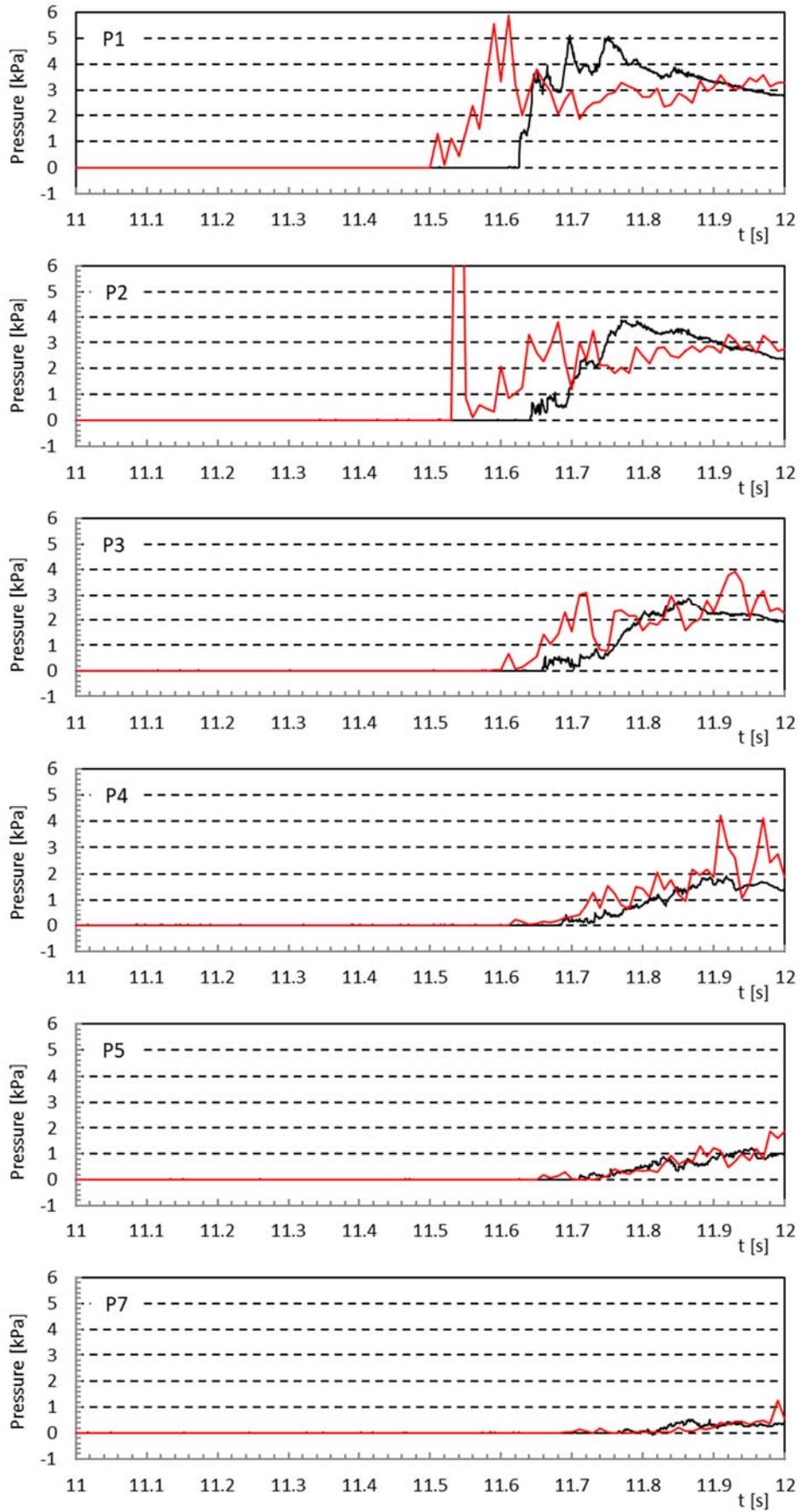


图- 9.3.9 波压时系列波形 (漂流物 TypeD, 初期位置 0.5m, F-We20-D-05) (1/2)

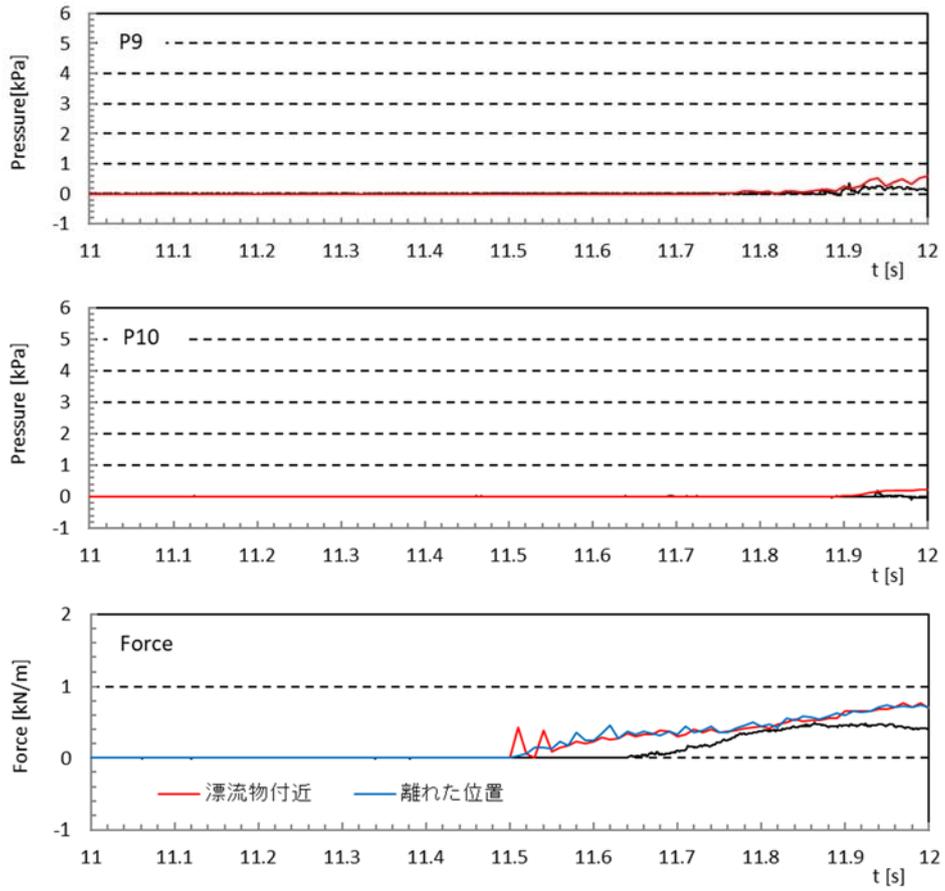


図- 9.3.9 波圧時系列波形（漂流物 TypeD, 初期位置 0.5m, F-We20-D-05）(2/2)

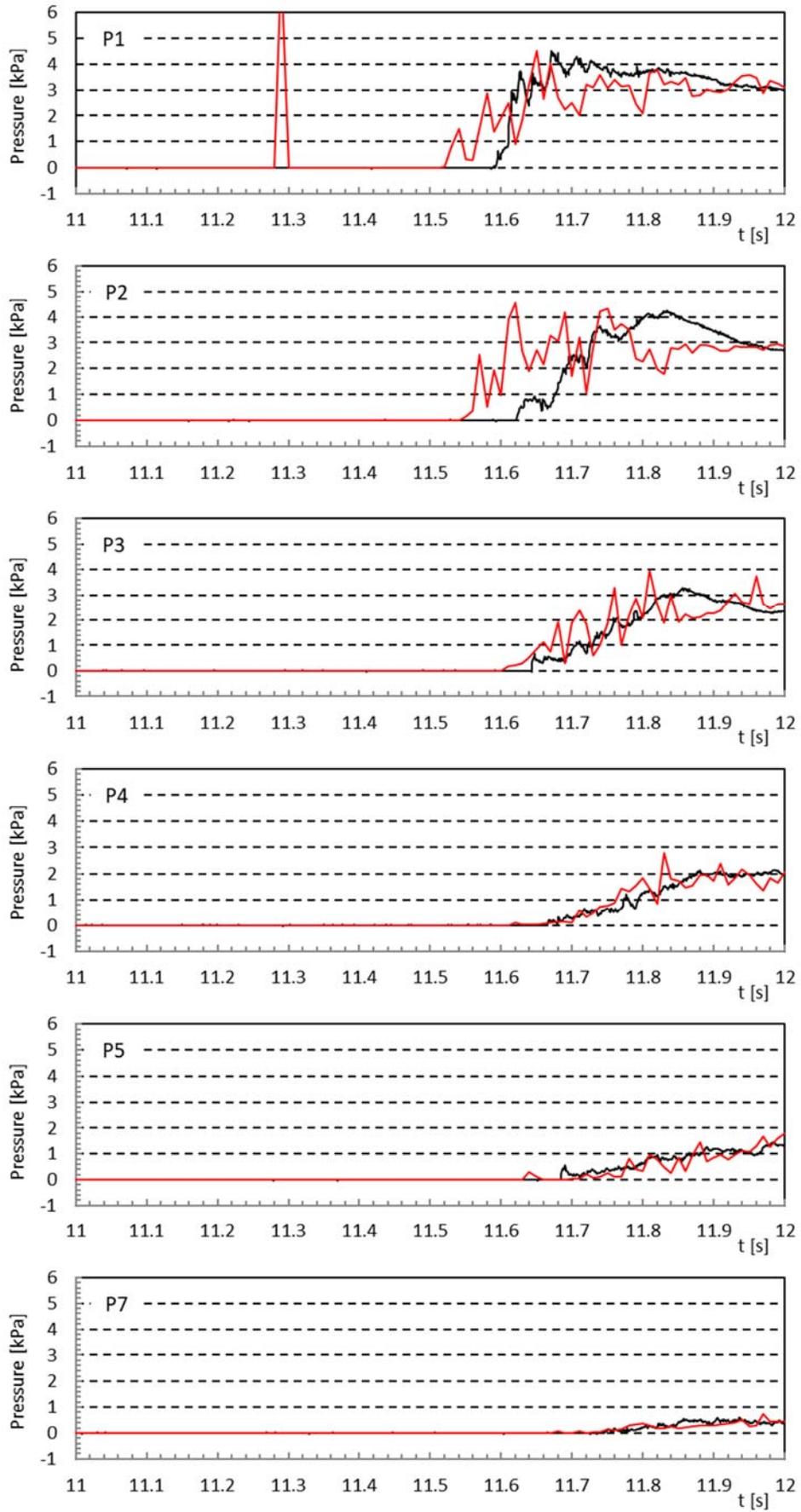


图- 9.3.10 波压時系列波形 (漂流物 TypeD, 初期位置 2.0m, F-We20-D-20) (1/2)

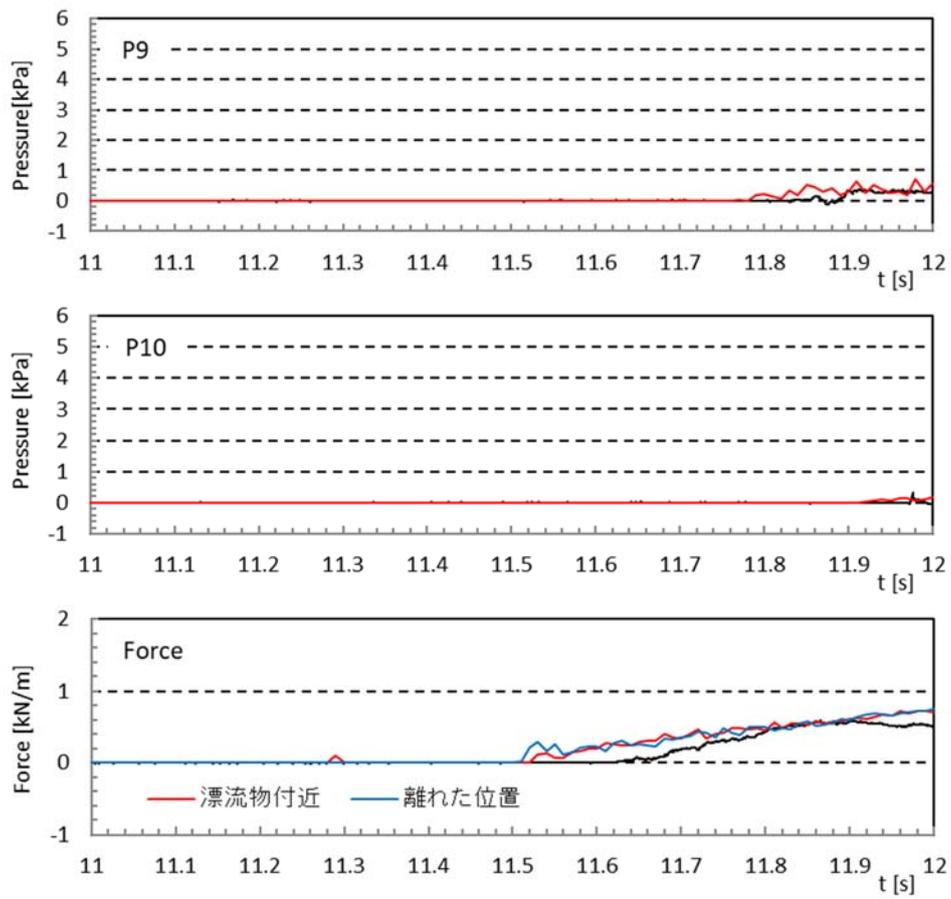


図- 9.3.10 波圧時系列波形（漂流物 TypeD, 初期位置 2.0m, F-We20-D-20）(2/2)

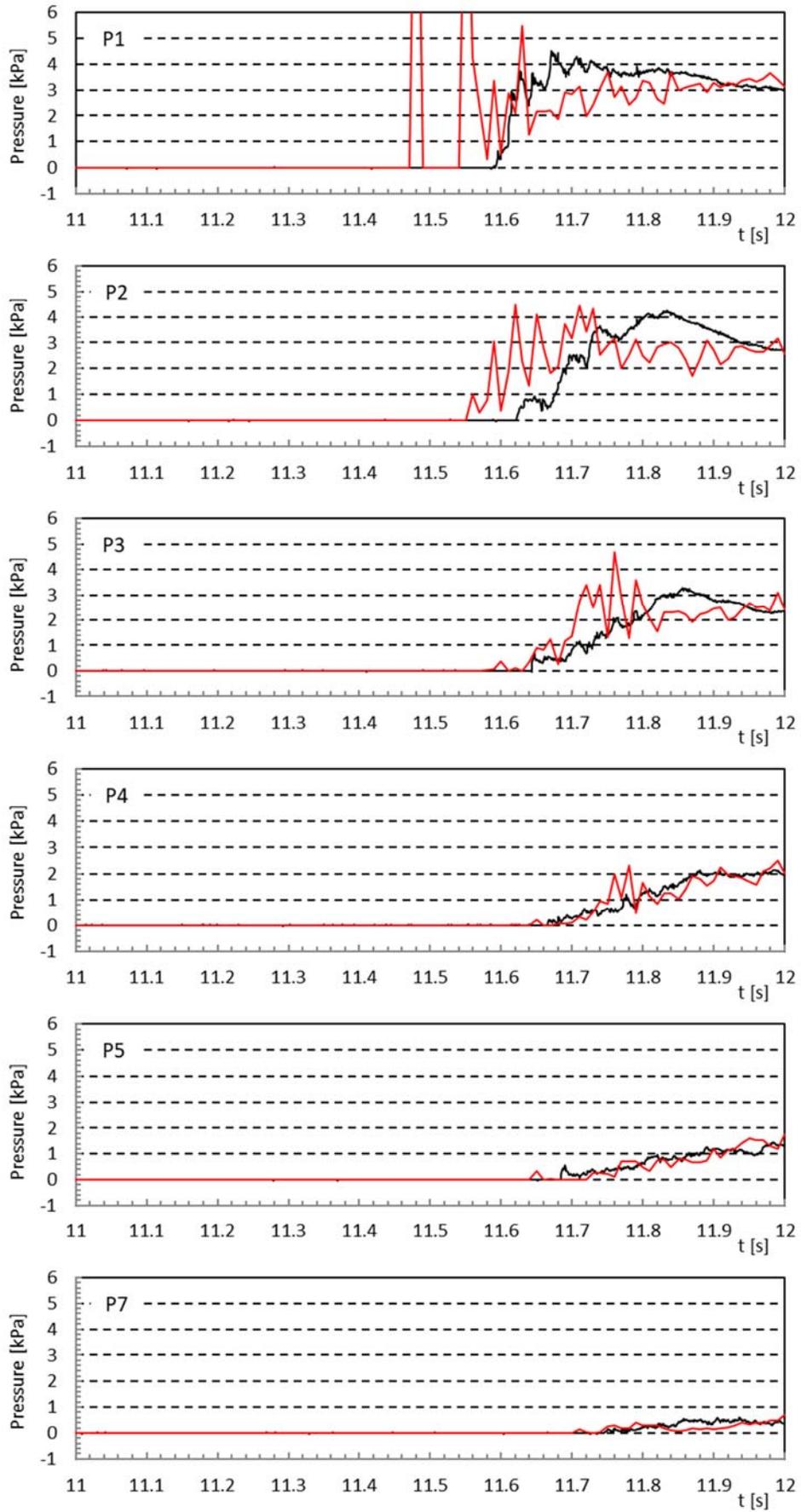


图- 9.3.11 波压時系列波形 (漂流物 TypeD, 初期位置 3.5m, F-We20-D-35) (1/2)

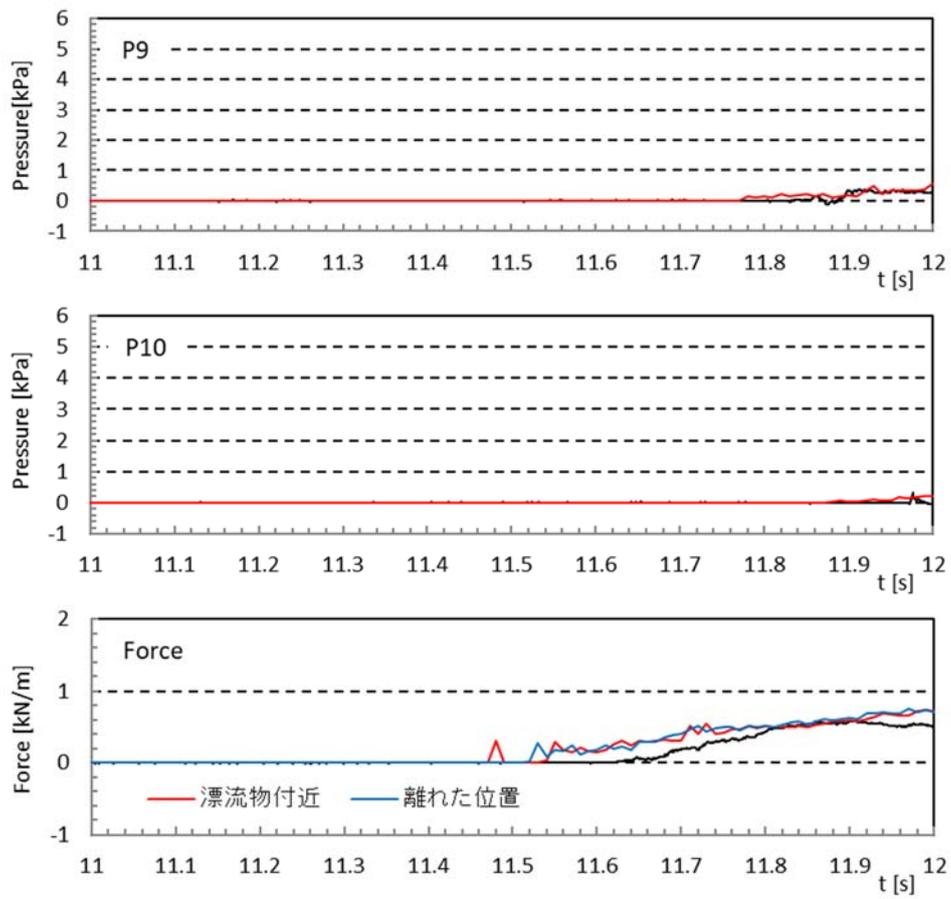


図- 9.3.11 波圧時系列波形 (漂流物 TypeD, 初期位置 3.5m, F-We20-D-35) (2/2)

#### 9.3.4. 圧力の鉛直分布

表- 9.3.1 に、堤体へ津波が到達した時刻と、漂流物の先端位置がもっとも堤体に近づいた時刻を示す。

解析結果は、津波到達の前後に衝突あるいは最接近しているが、津波の到達前に漂流物が衝突する現象が生じており、今後検討する必要がある。

漂流物が最接近した時刻における圧力の鉛直圧力分布を図- 9.3.12～図- 9.3.14 に示す。鉛直分布は、漂流物が最接近した堤体面における幅 0.005m（粒径サイズ）断面と、堤体中心から 0.05 m離れた断面（漂流物最接近した位置からも 0.05m以上離れる）の圧力分布である。

漂流物の最接近位置と離れた位置の圧力の差異から、衝突の可能性について検討した結果を表- 9.3.2 にまとめる。ここで、10kPa 以上の顕著な差異が見られたケースを衝突の可能性が高い

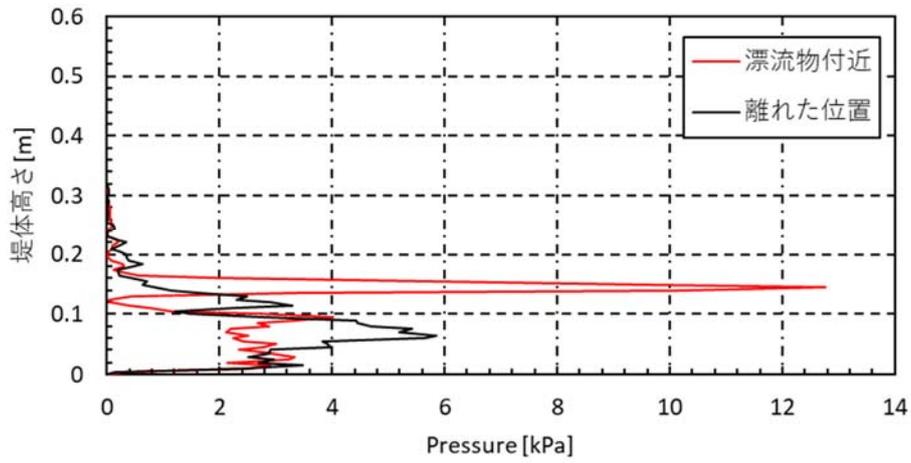
「○」とし、差異は 10kPa 以下と小さいが、圧力の鉛直分布や前述の時系列を確認することで衝突の可能性が確認できるケースを「△」、差異がほとんど確認できないものを衝突の可能性が低い「×」とした。

表- 9.3.1 津波到達時刻と漂流物最接近時刻

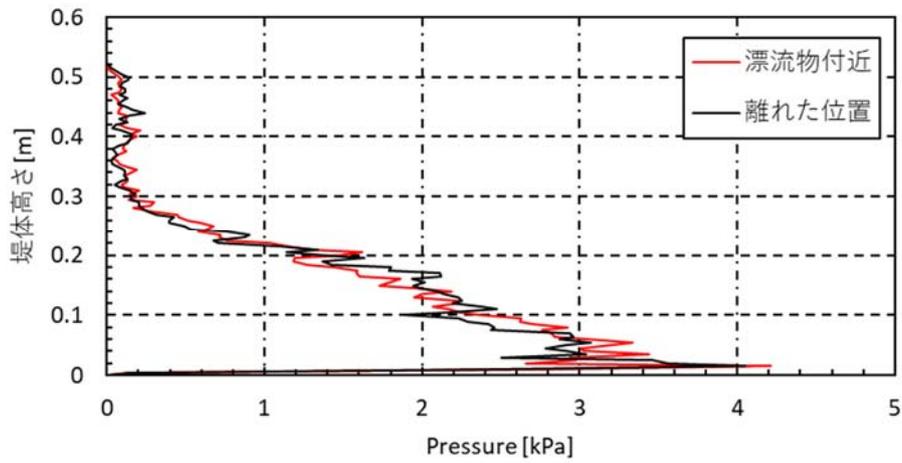
ケース名	津波到達時刻	漂流物最接近時刻
F-We20-A-05	11.51s	11.72s
F-We20-A-20	11.52s	11.89s
F-We20-A-35	11.51s	11.47s
F-We20-C-05	11.51s	11.74s
F-We20-C-20	11.51s	11.79s
F-We20-C-35	11.49s	11.56s
F-We20-D-05	11.50s	11.54s
F-We20-D-20	11.49s	11.29s
F-We20-D-35	11.51s	11.48s

表- 9.3.2 衝突判断結果

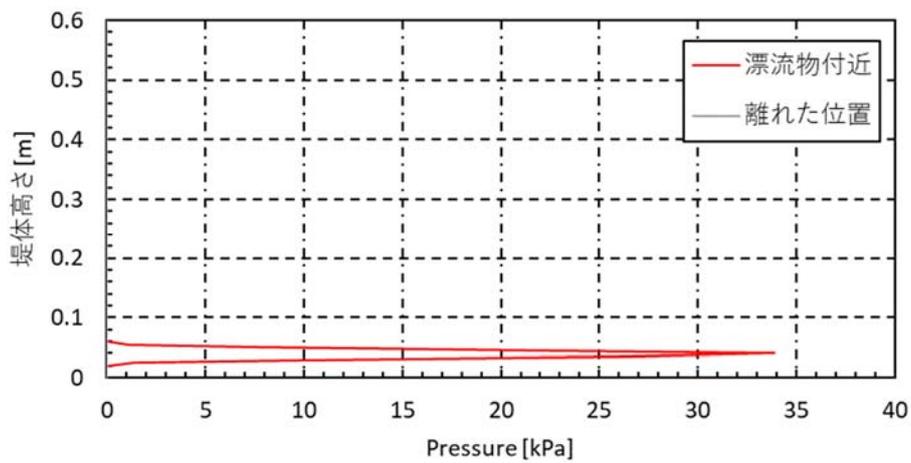
ケース名	漂流物最接近時の 圧力差	衝突判定
F-We20-A-05	11.92	○
F-We20-A-20	- - -	×
F-We20-A-35	33.89	○
F-We20-C-05	12.91	○
F-We20-C-20	13.14	○
F-We20-C-35	44.55	○
F-We20-D-05	27.17	○
F-We20-D-20	7.81	△
F-We20-D-35	23.61	○



初期位置 0.5m (F-We20-A-05)

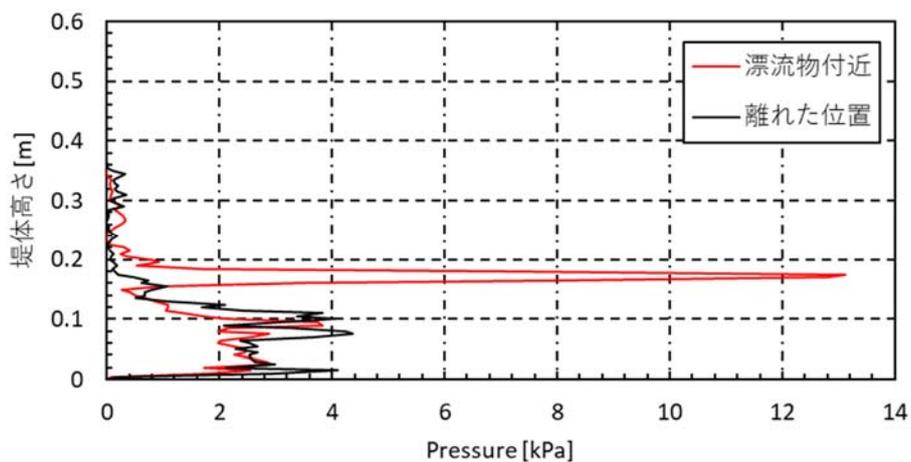


初期位置 2.0m (F-We20-A-20)

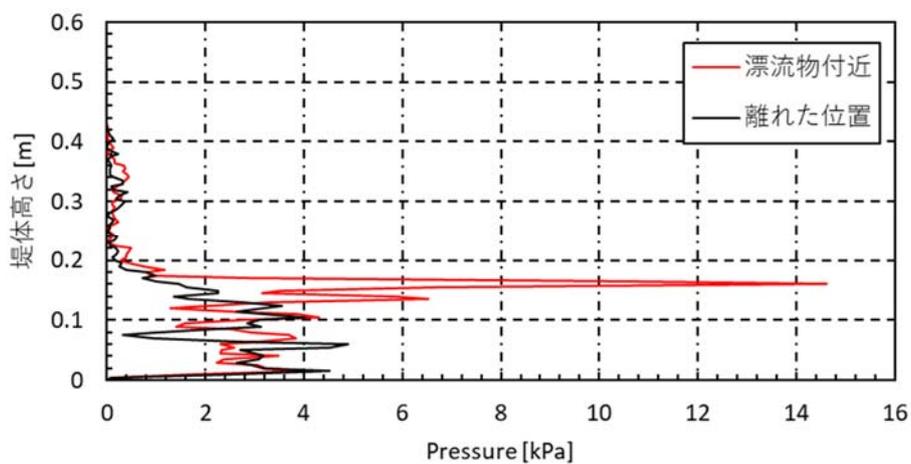


初期位置 3.5m (F-We20-A-35)

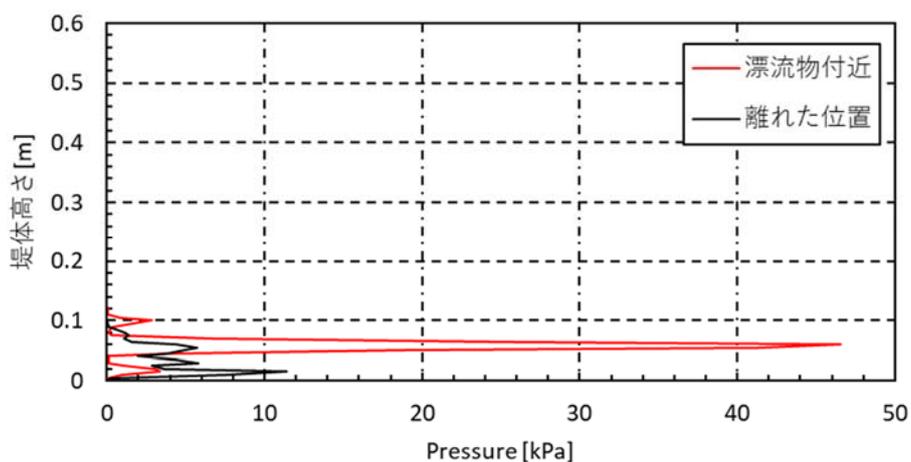
図- 9.3.12 鉛直波圧分布 (漂流物 TypeA)



初期位置 0.5m (F-We20-C-05)

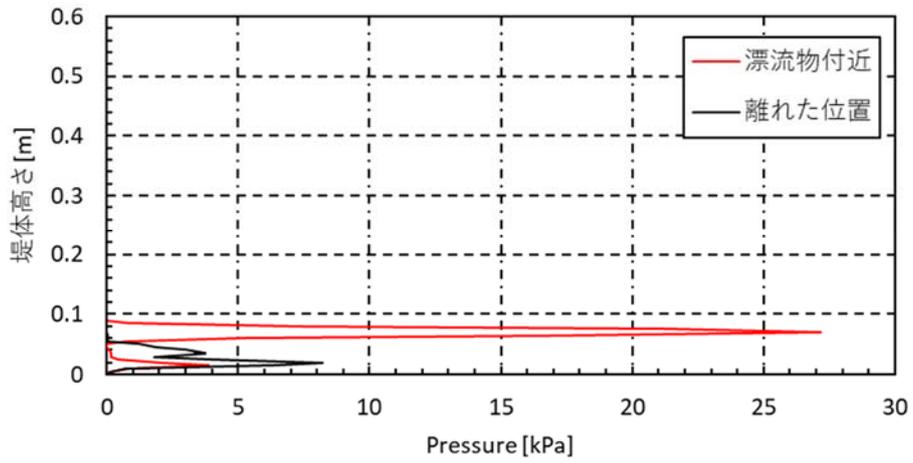


初期位置 2.0m (F-We20-C-20)

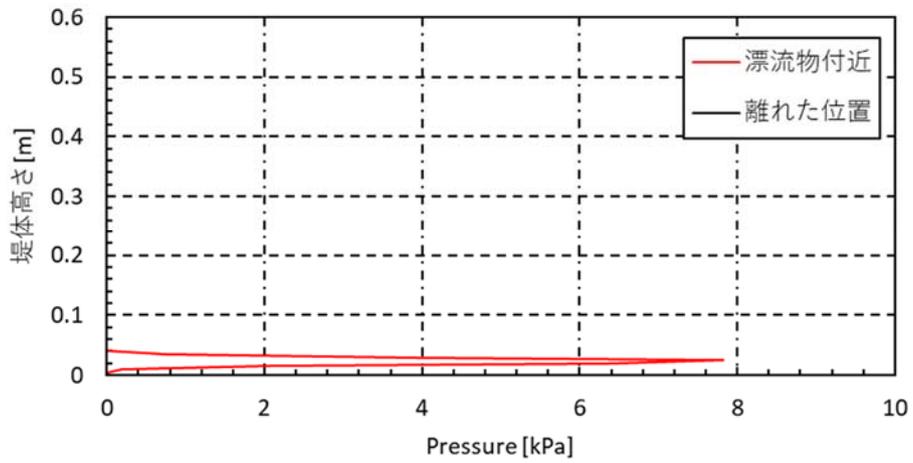


初期位置 3.5m (F-We20-C-35)

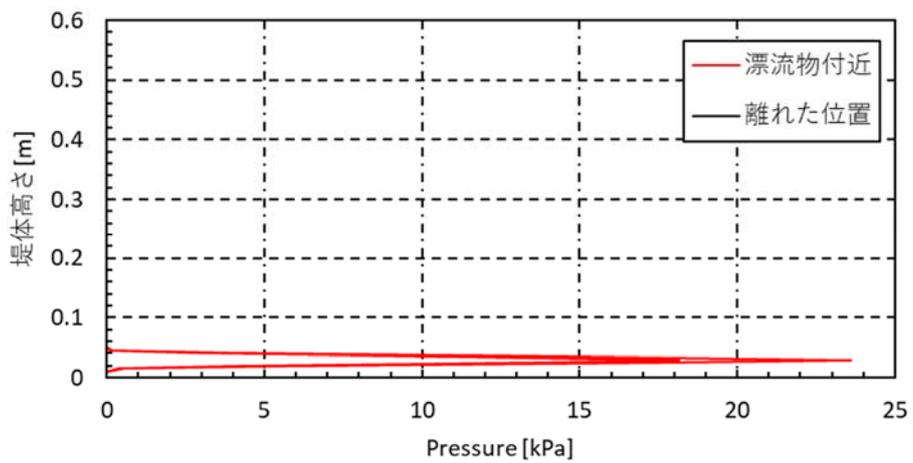
図- 9.3.13 鉛直波圧分布 (漂流物 TypeC)



初期位置 0.5m (F-We20-D-05)



初期位置 2.0m (F-We20-D-20)

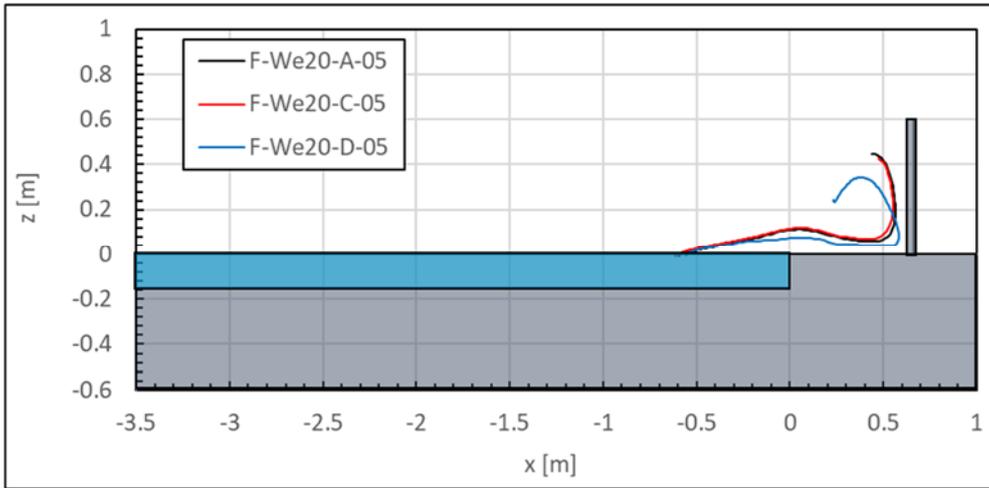


初期位置 3.5m (F-We20-D-35)

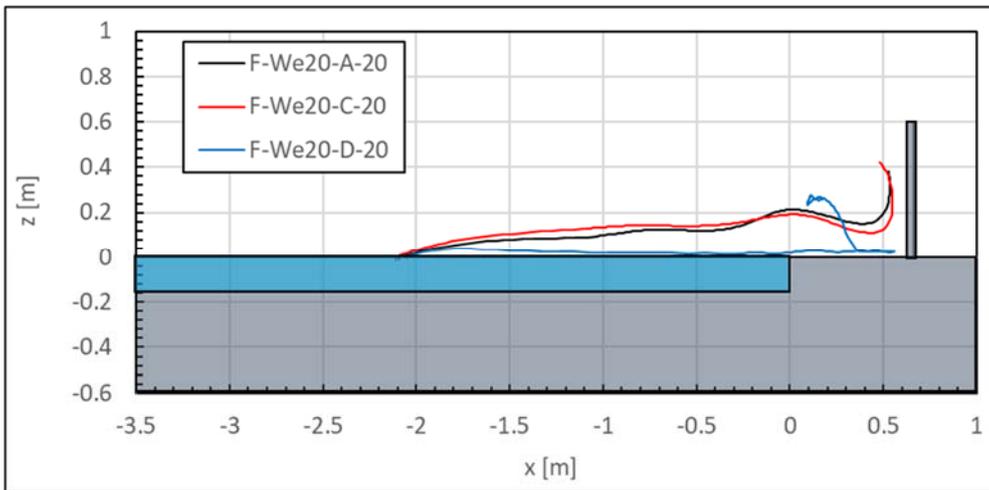
図- 9.3.14 鉛直波圧分布 (漂流物 TypeD)

### 9.3.5. 漂流物の移動軌跡

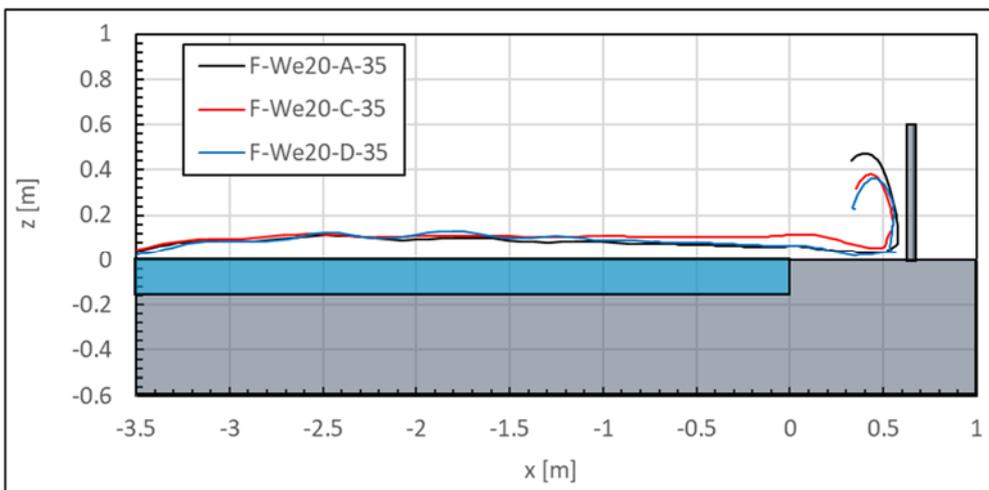
漂流物が堤体に衝突した可能性を更に検討するため、図-9.3.15に、漂流物の移動軌跡(重心点)および比較結果を示す。前述の圧力の計測結果からの判断では、衝突が確認されるケースが少なかったが、移動軌跡を確認すると多くのケースで漂流物は堤体近傍まで近づいていることが分かる。



初期位置 0.5m



初期位置 2.0m



初期位置 3.5m

図- 9.3.15 漂流物の移動軌跡

### 9.3.6. 漂流物の衝突状況

解析結果については可視化のため動画を作成した。図- 9.3.16～図- 9.3.24 に、これらのスナップショットを示す。漂流物および水面を示した3次元鳥瞰図をケース毎に順に示す。

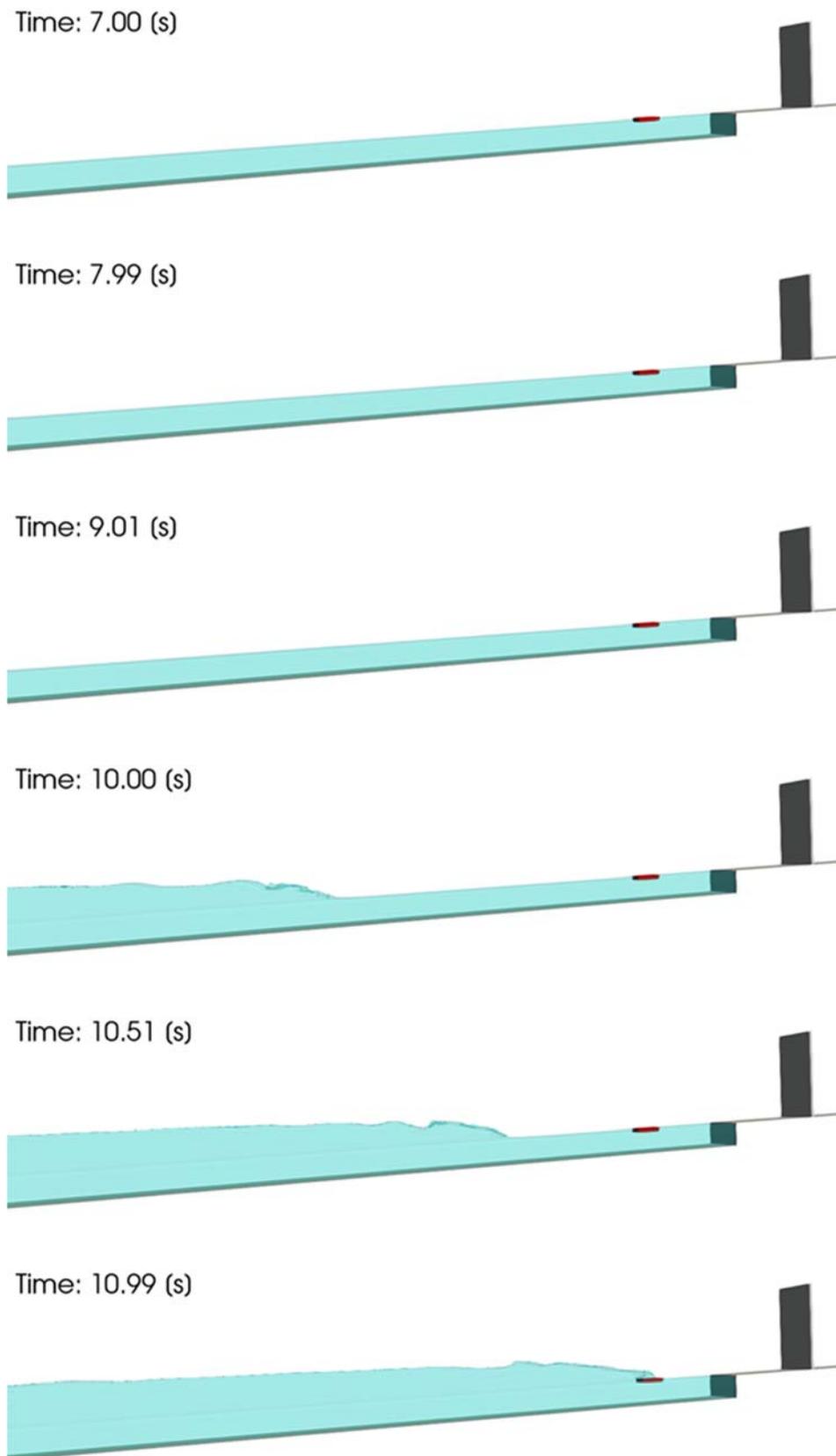
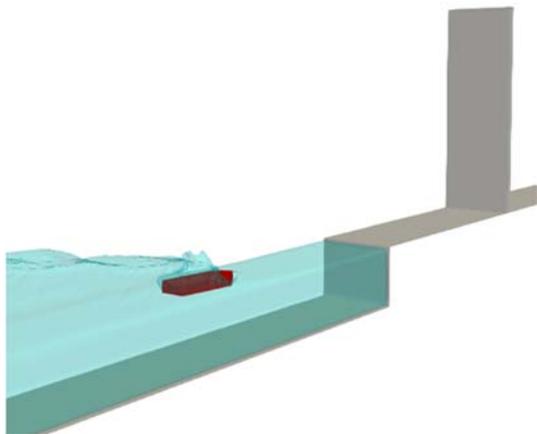
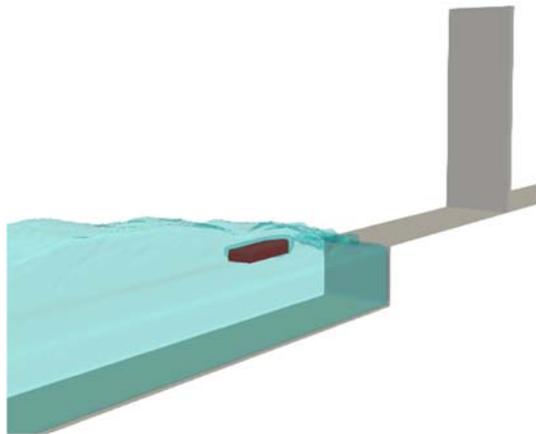


図- 9.3.16 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-A-05) (1/2)

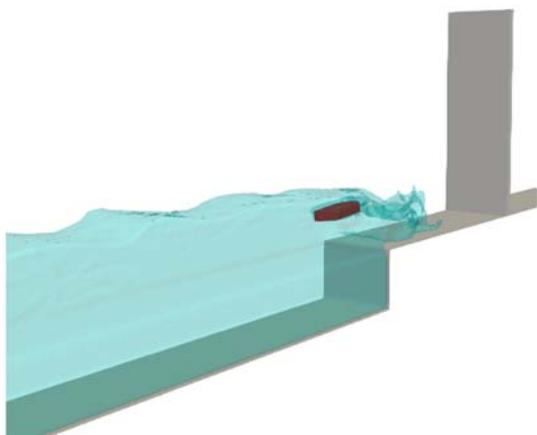
Time: 11.00 (s)



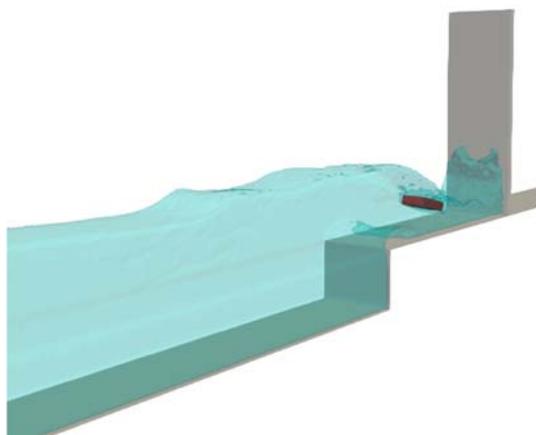
Time: 11.20 (s)



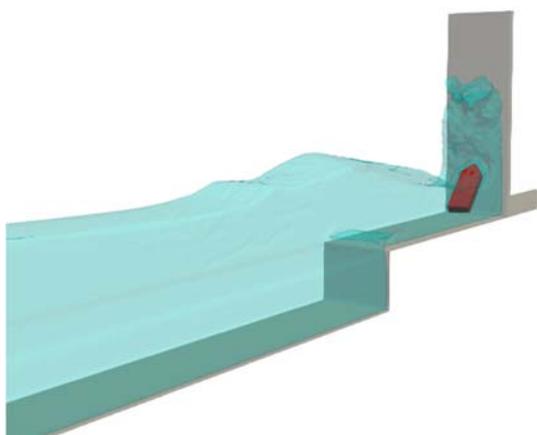
Time: 11.40 (s)



Time: 11.60 (s)



Time: 11.72 (s)



Time: 12.00 (s)

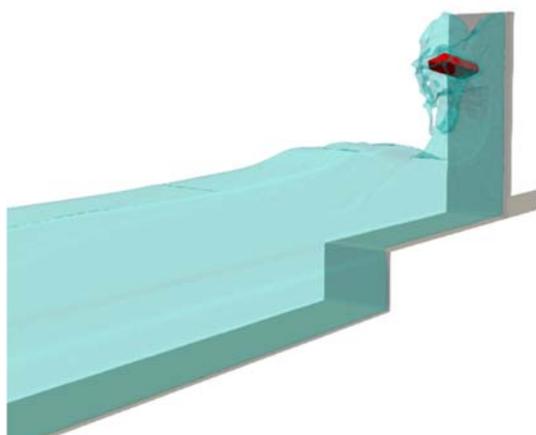


図-9.3.16 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-A-05) (2/2)

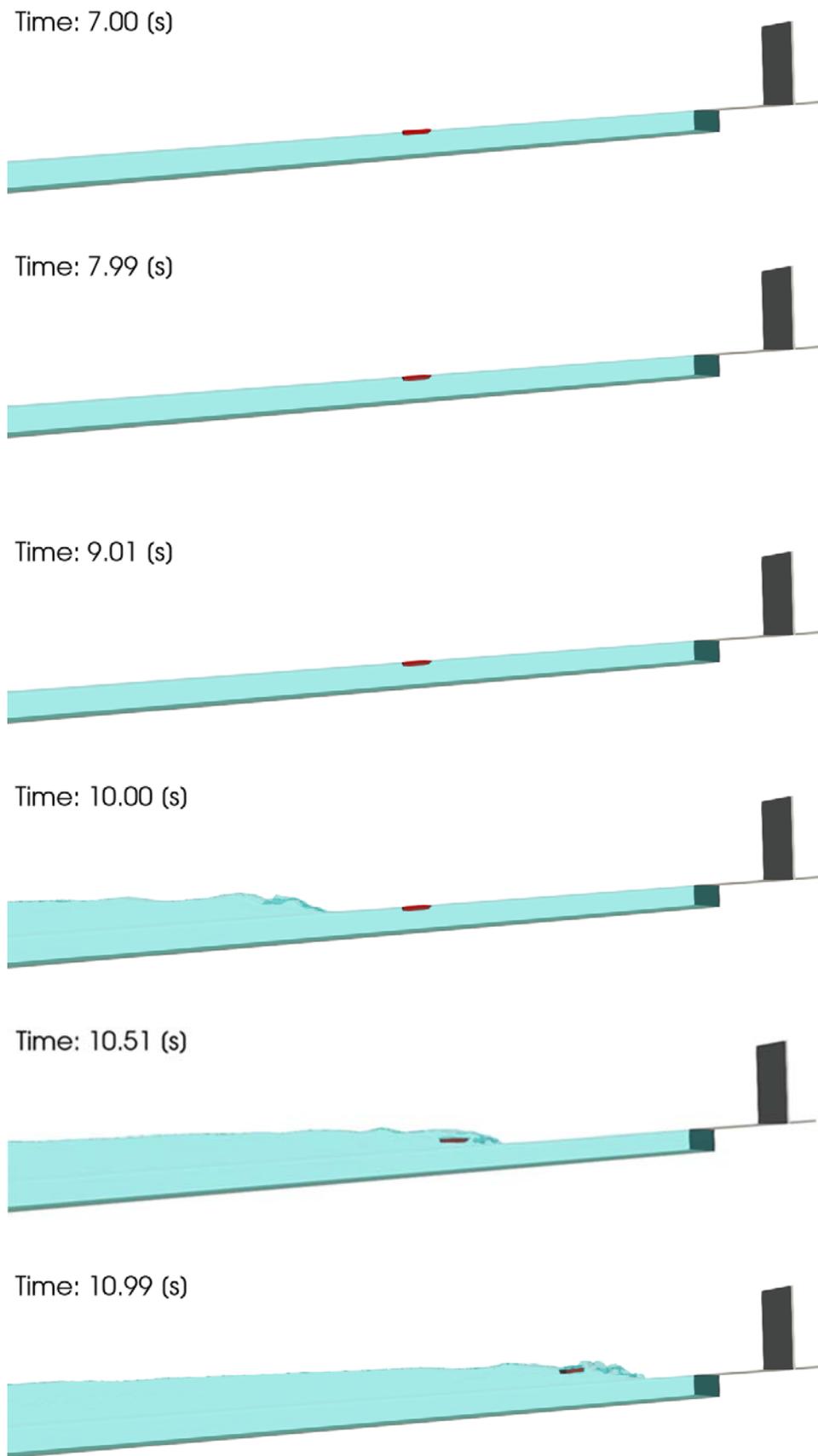
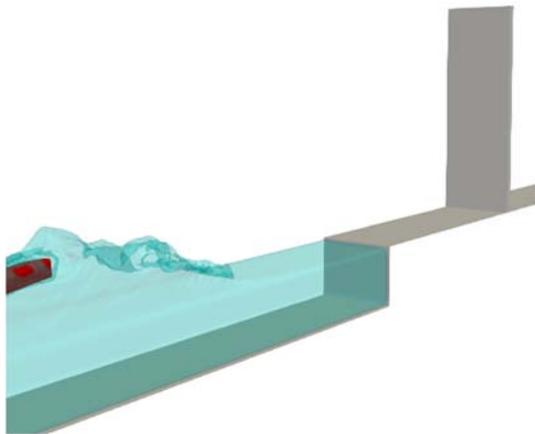
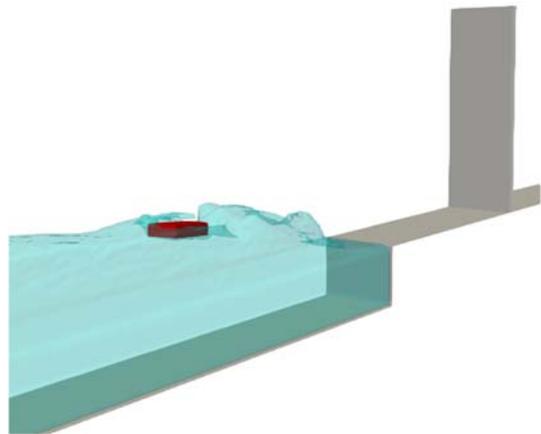


図- 9.3.17 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-A-20) (1/2)

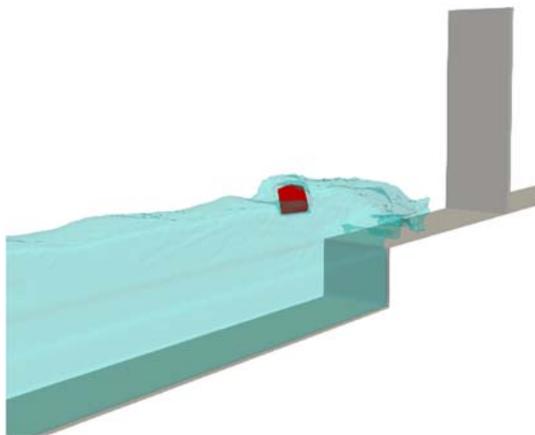
Time: 11.00 (s)



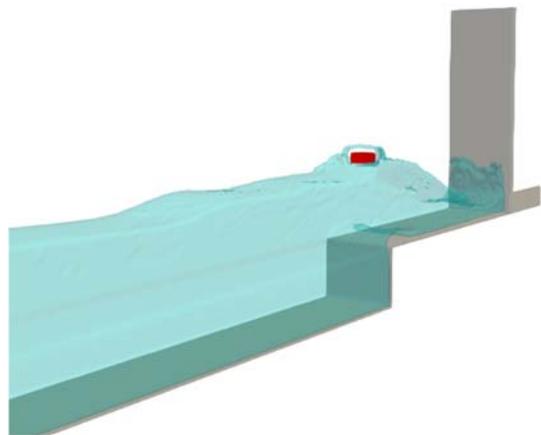
Time: 11.20 (s)



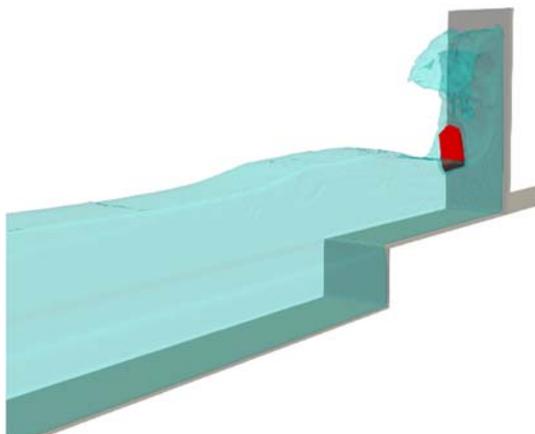
Time: 11.40 (s)



Time: 11.60 (s)



Time: 11.89 (s)



Time: 12.00 (s)

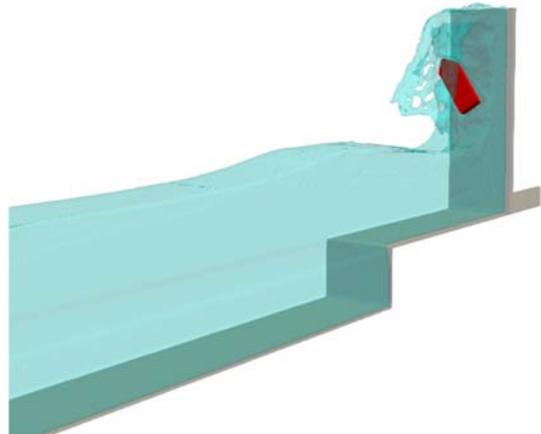


図- 9.3.17 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-A-20) (2/2)

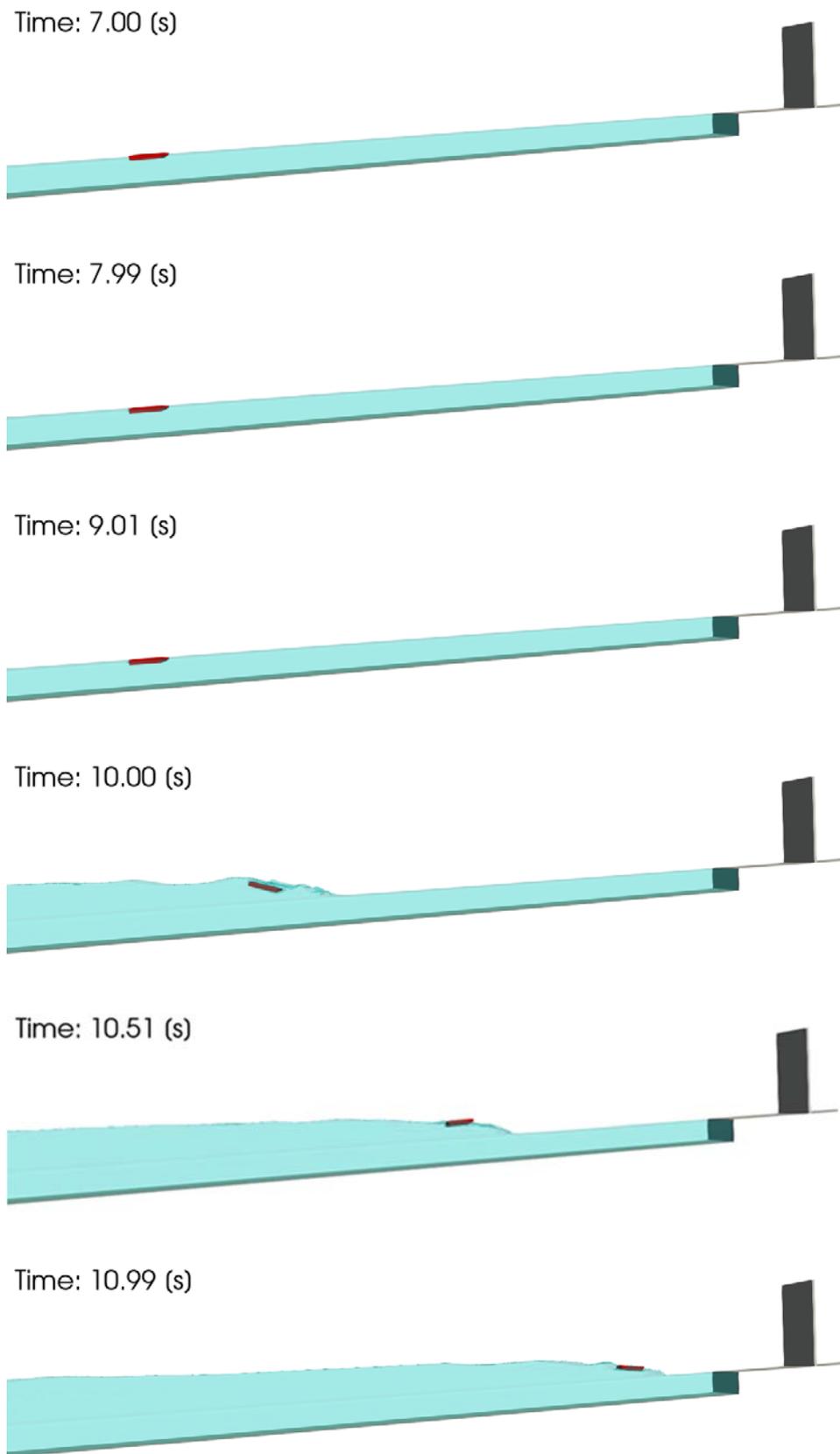
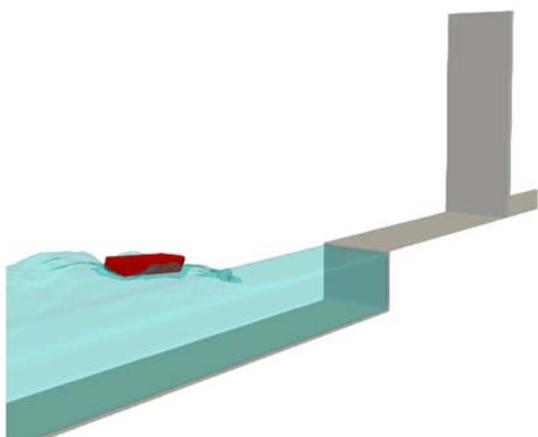
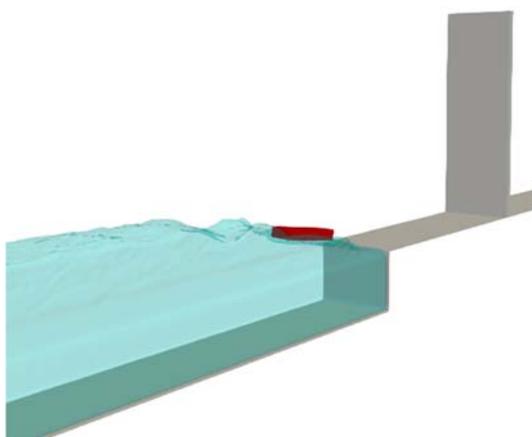


図- 9.3.18 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-A-35) (1/2)

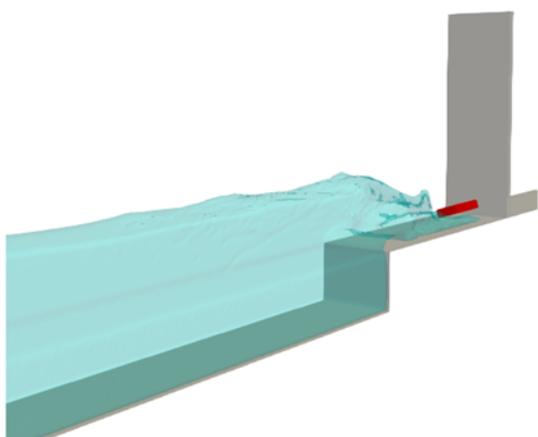
Time: 11.00 (s)



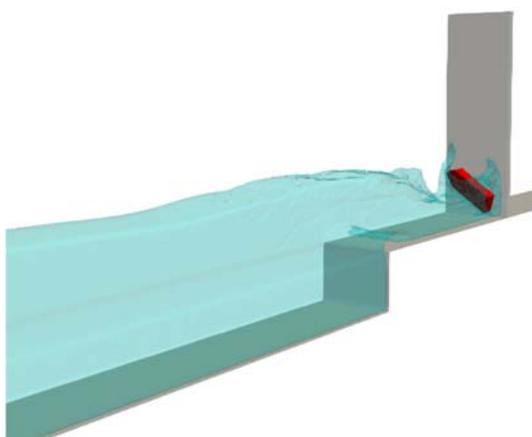
Time: 11.20 (s)



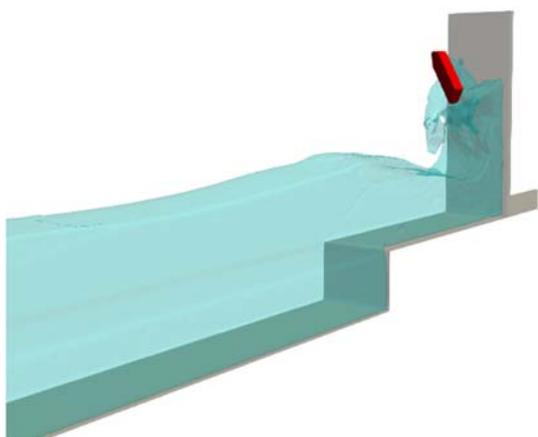
Time: 11.47 (s)



Time: 11.60 (s)



Time: 11.80 (s)



Time: 12.00 (s)

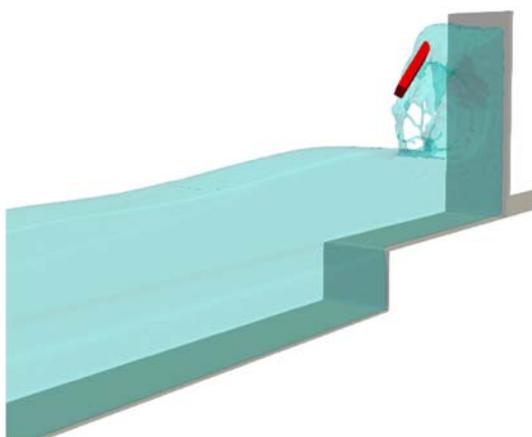


図-9.3.18 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-A-35) (2/2)

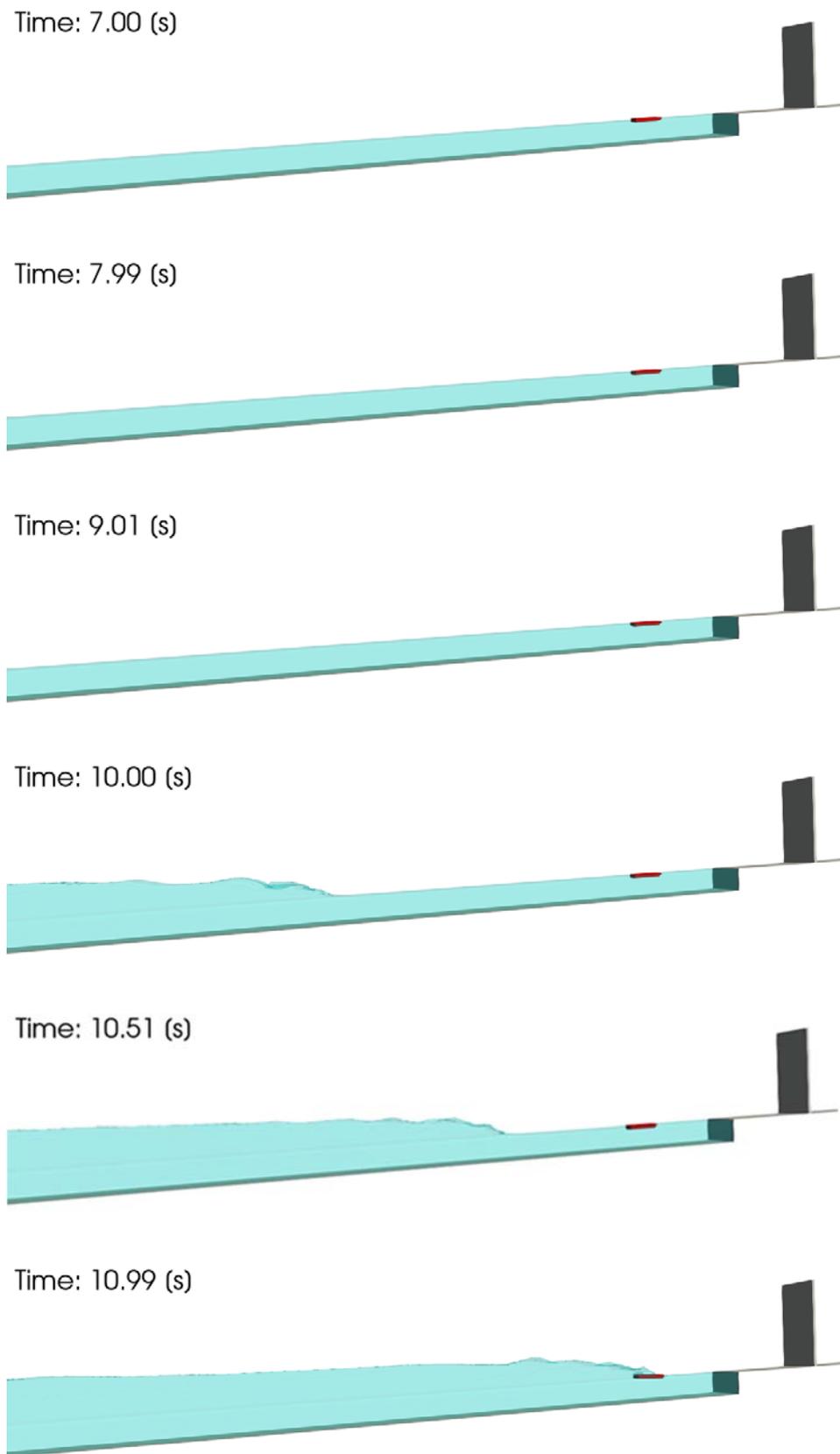


図- 9.3.19 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-C-05) (1/2)

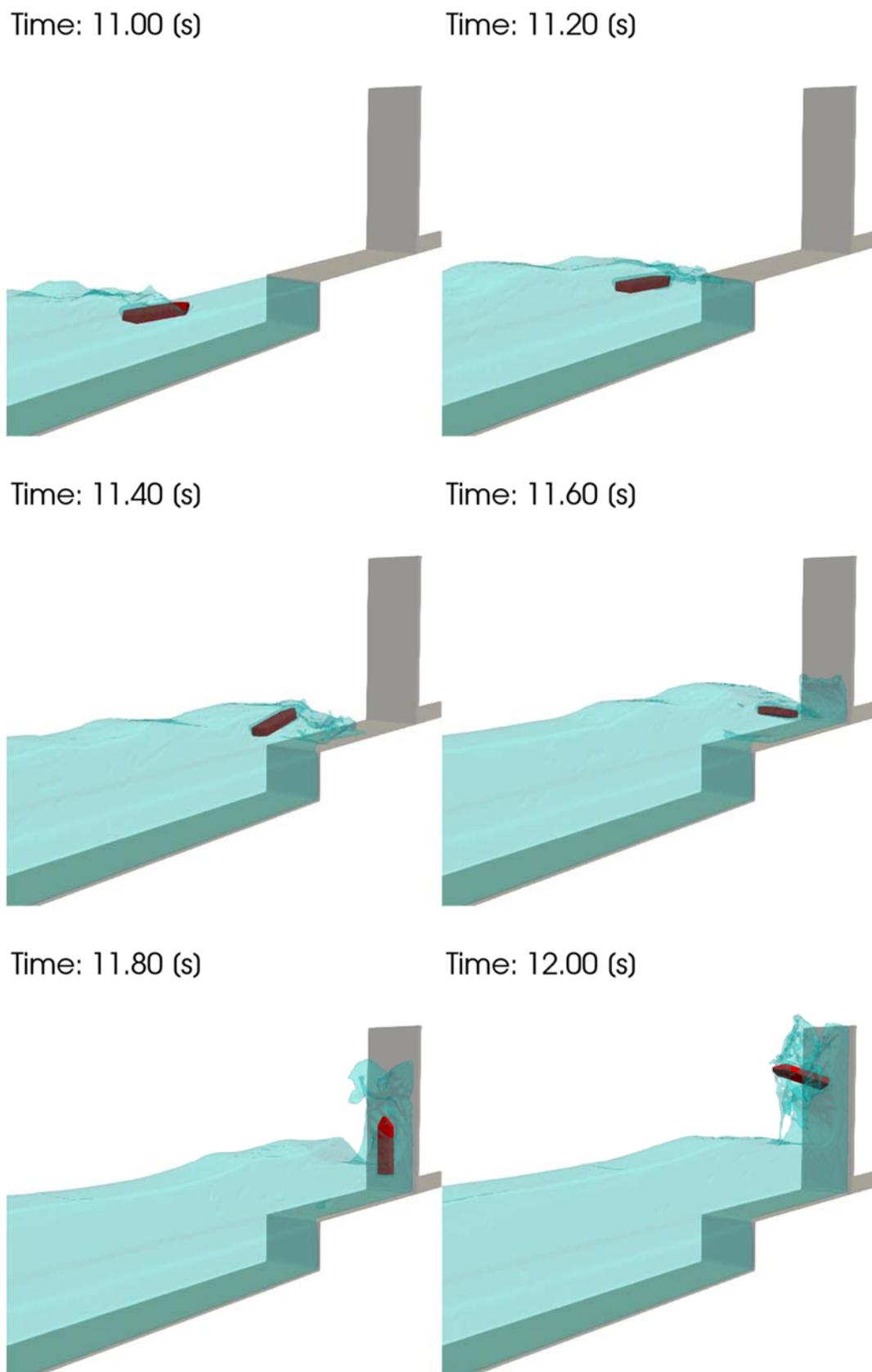


図-9.3.19 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-C-05) (2/2)

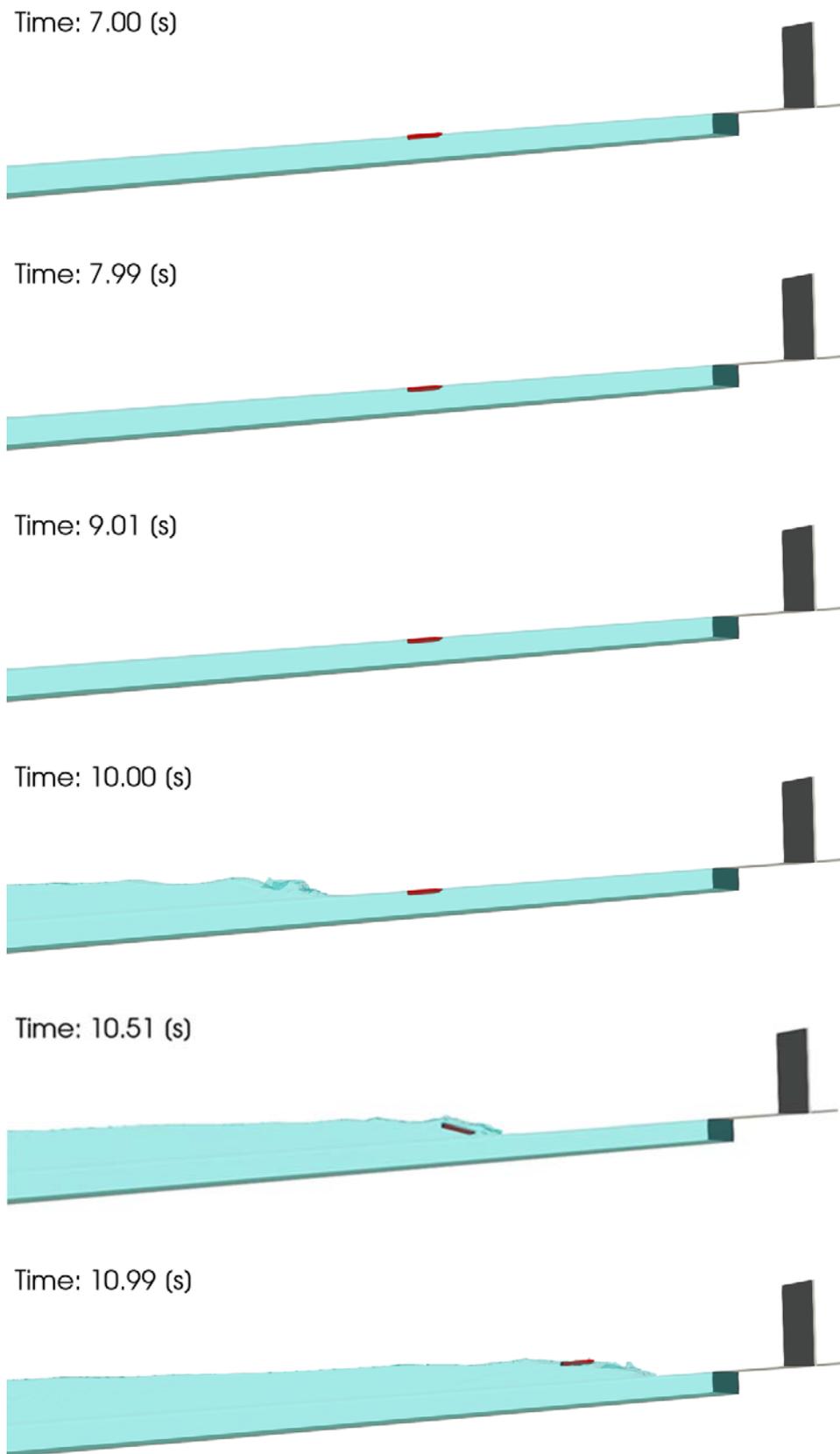
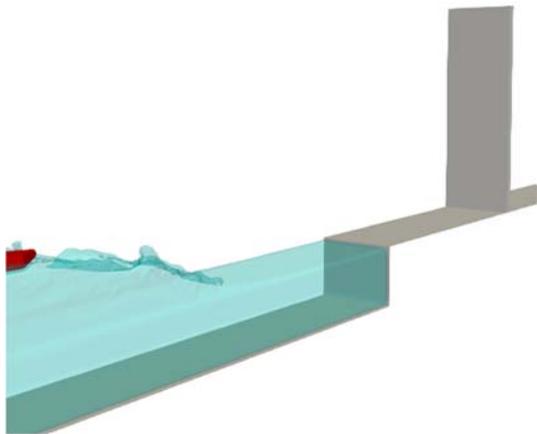
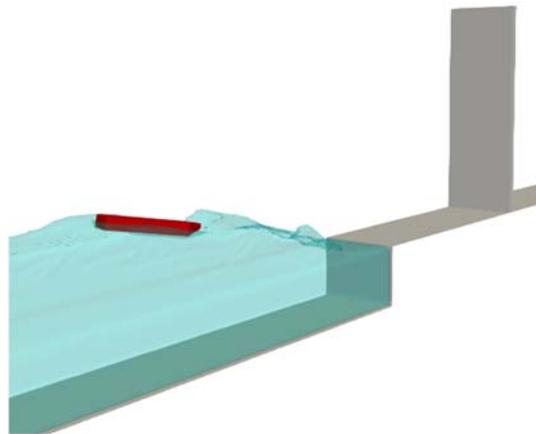


図- 9.3.20 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-C-20) (1/2)

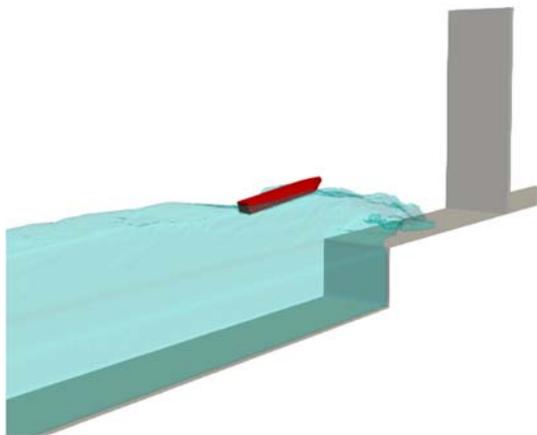
Time: 11.00 (s)



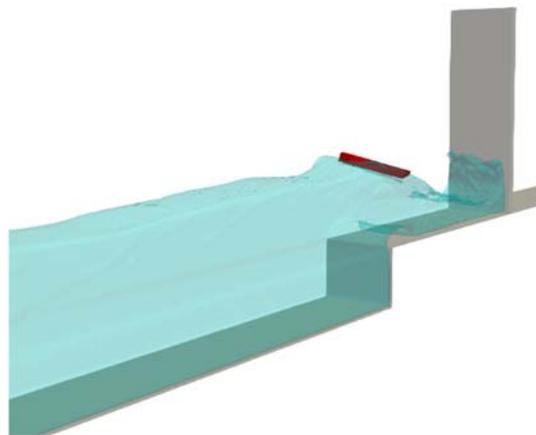
Time: 11.20 (s)



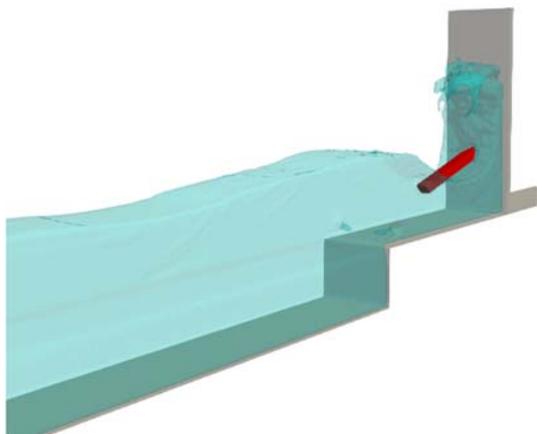
Time: 11.40 (s)



Time: 11.60 (s)



Time: 11.79 (s)



Time: 12.00 (s)

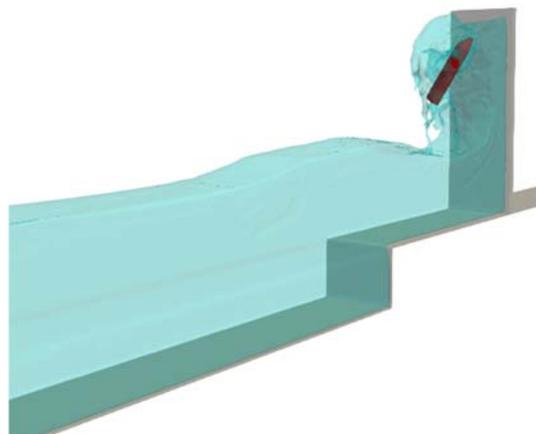


図- 9.3.20 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-C-20) (2/2)

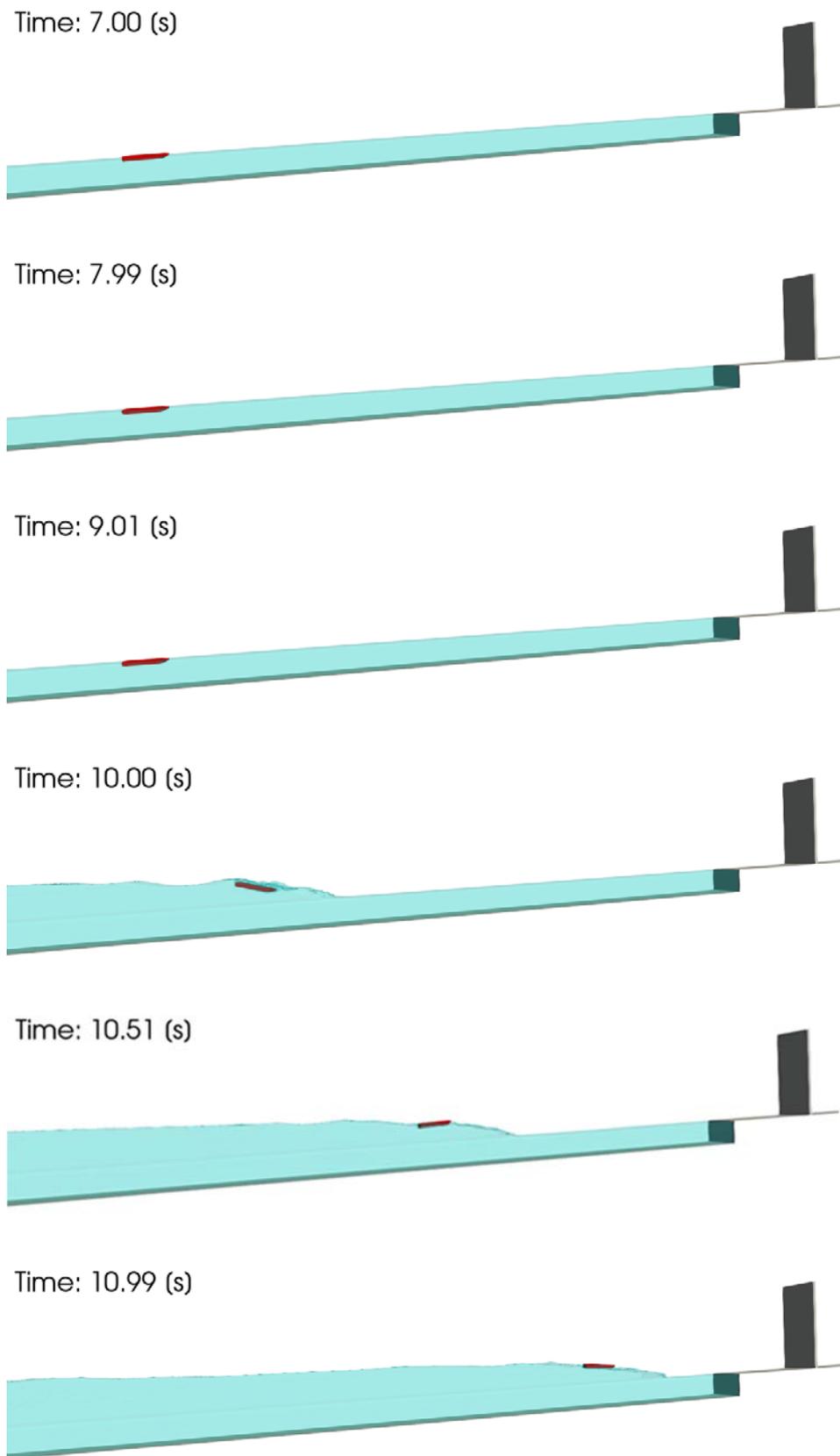
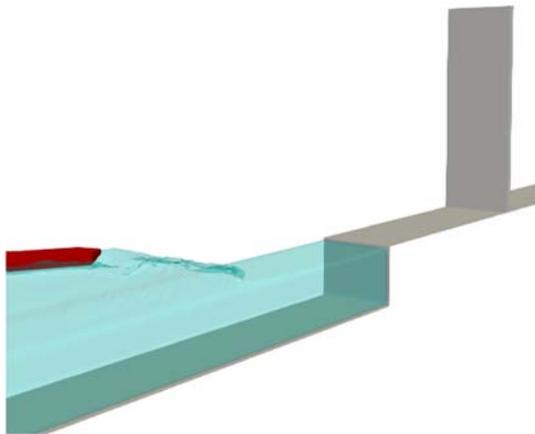
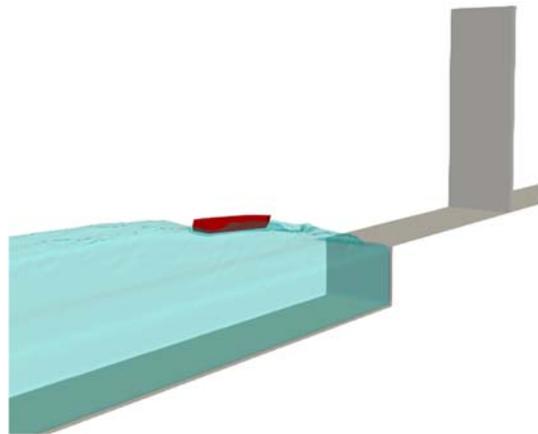


図- 9.3.21 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-C-35) (1/2)

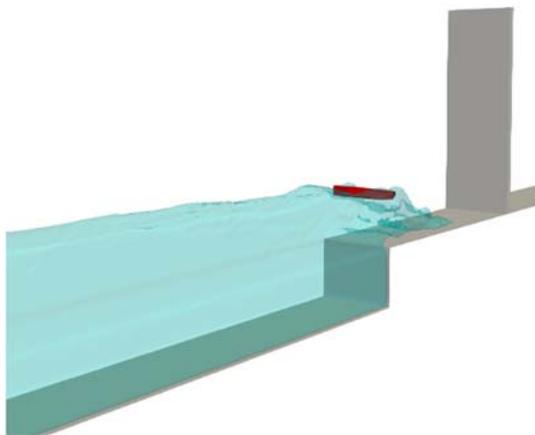
Time: 11.00 (s)



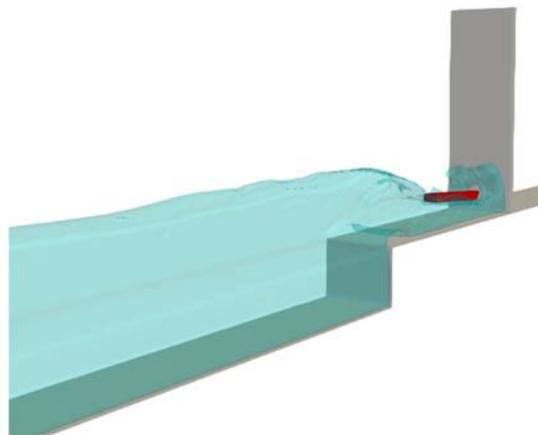
Time: 11.20 (s)



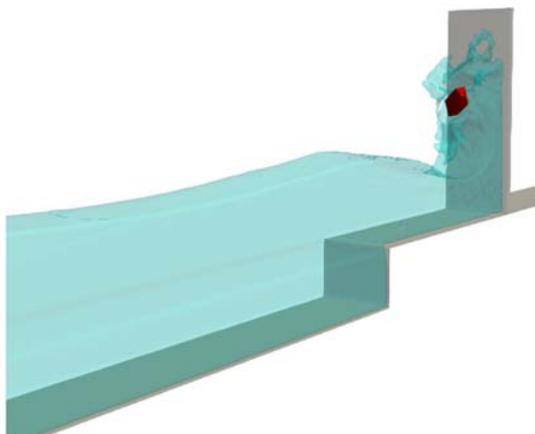
Time: 11.40 (s)



Time: 11.56 (s)



Time: 11.80 (s)



Time: 12.00 (s)

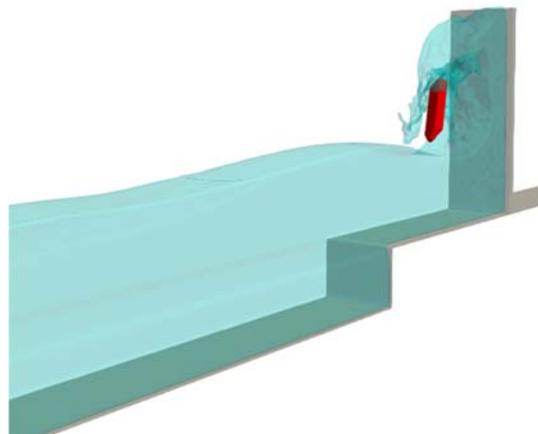


図-9.3.21 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-C-35) (2/2)

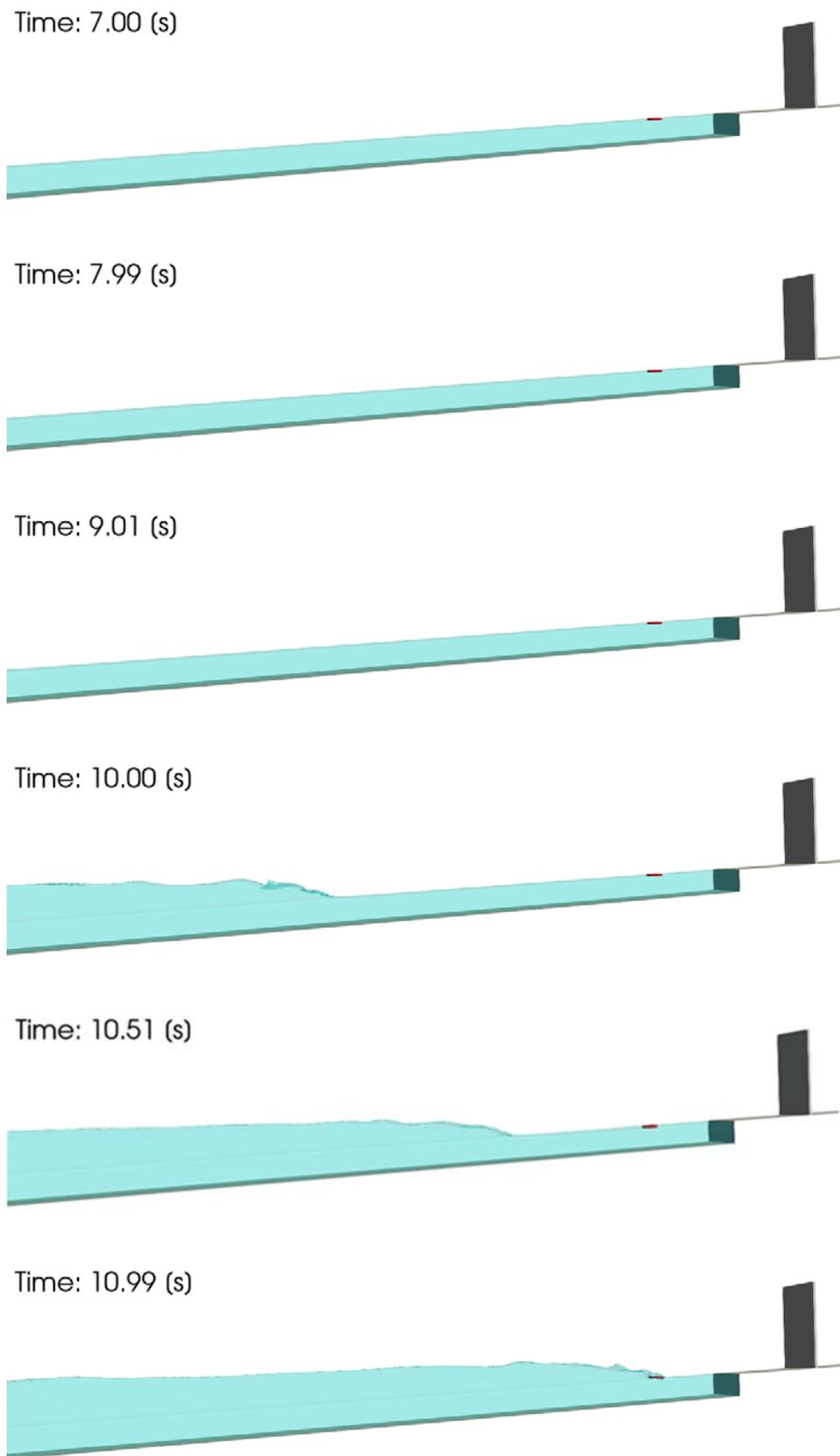


図- 9.3.22 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-D-05) (1/2)

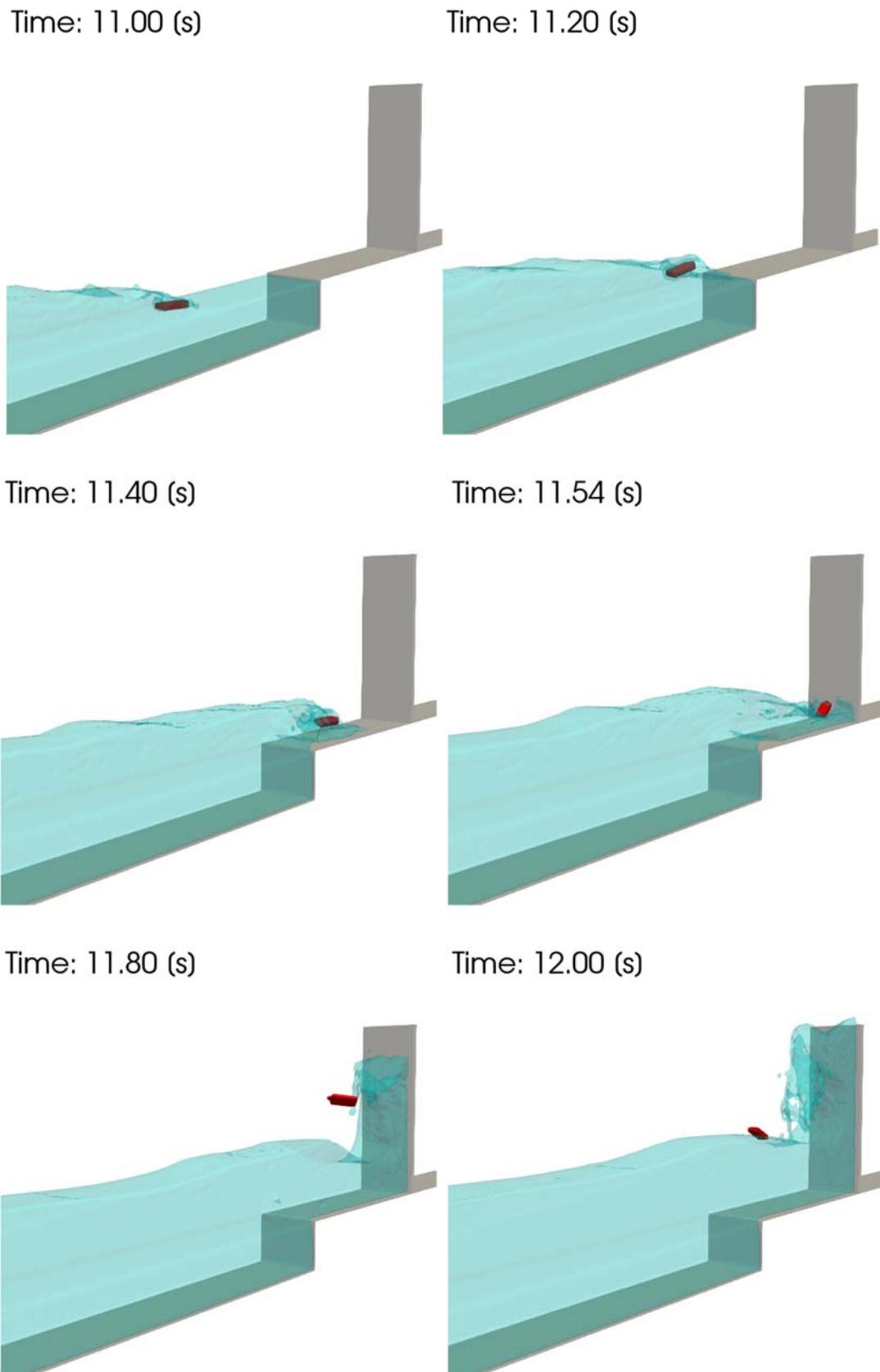


図-9.3.22 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-D-05) (2/2)

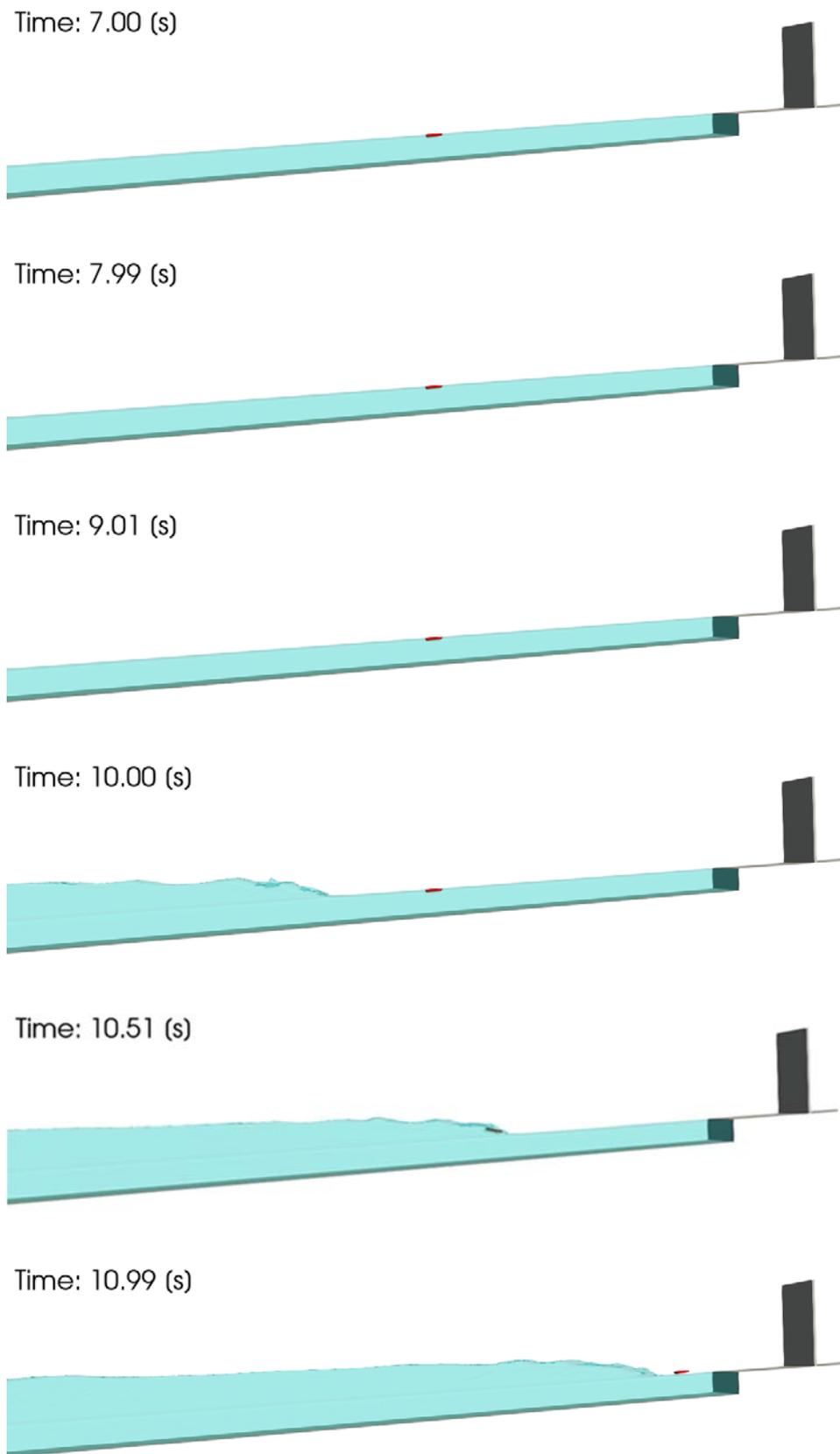
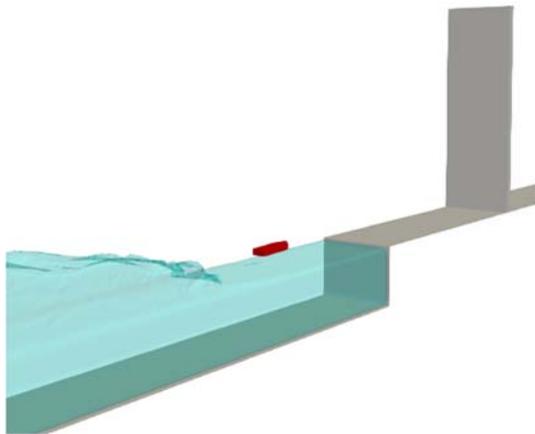
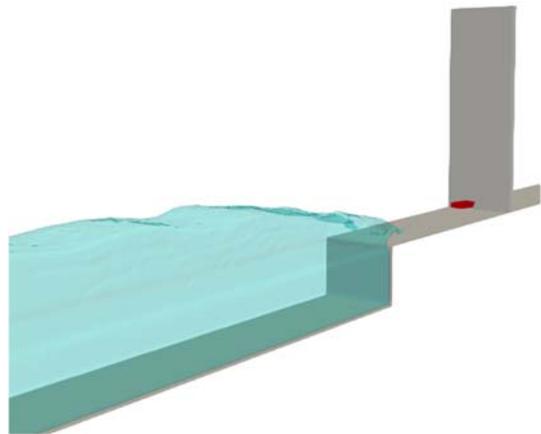


図- 9.3.23 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-D-20) (1/2)

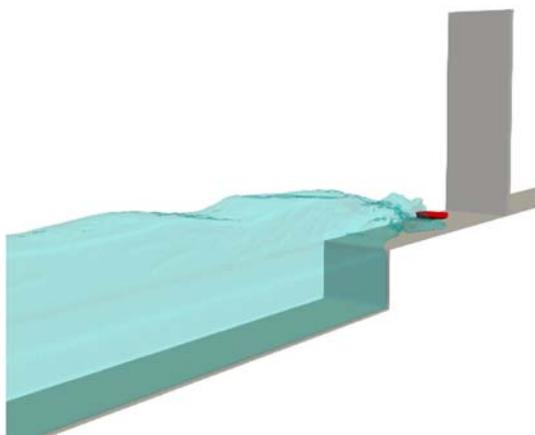
Time: 11.00 (s)



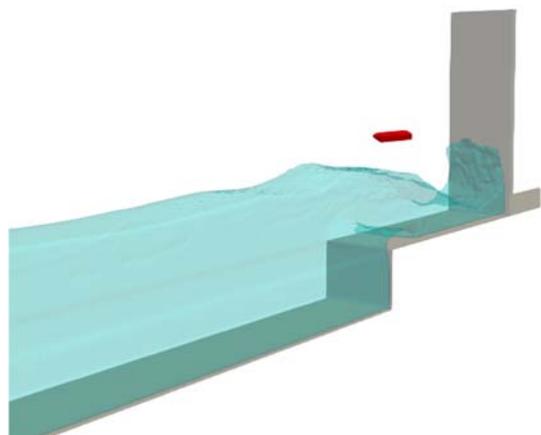
Time: 11.29 (s)



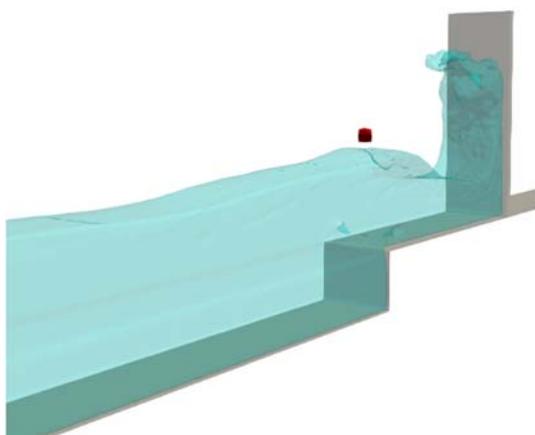
Time: 11.40 (s)



Time: 11.60 (s)



Time: 11.80 (s)



Time: 12.00 (s)

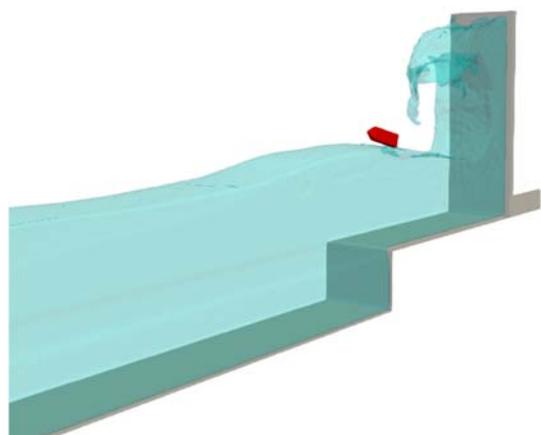


図-9.3.23 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F・We20-D-20) (2/2)

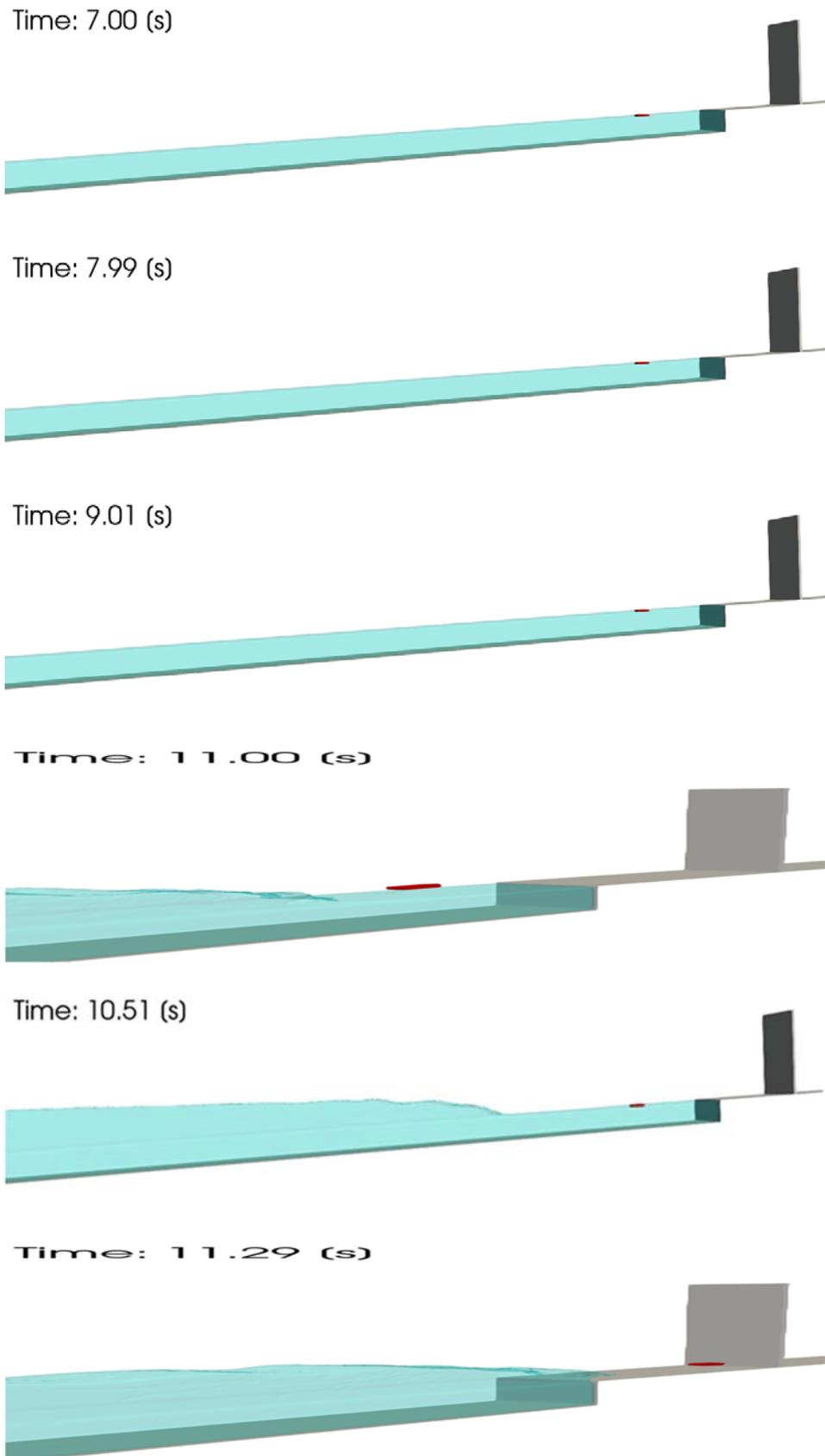
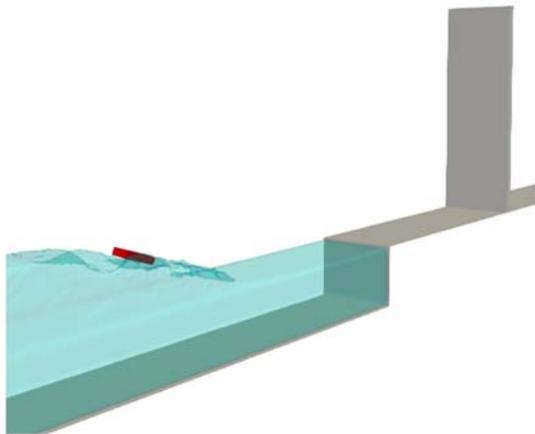
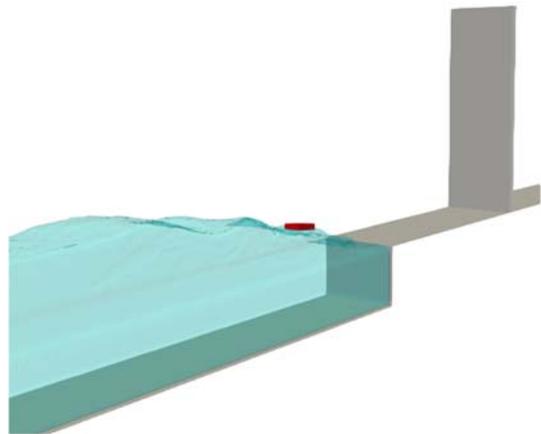


図- 9.3.24 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-D-35) (1/2)

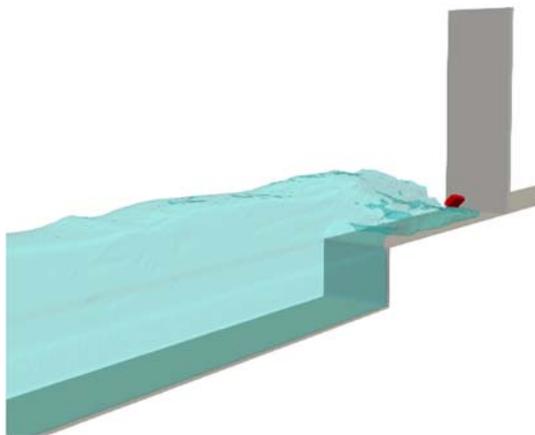
Time: 11.00 (s)



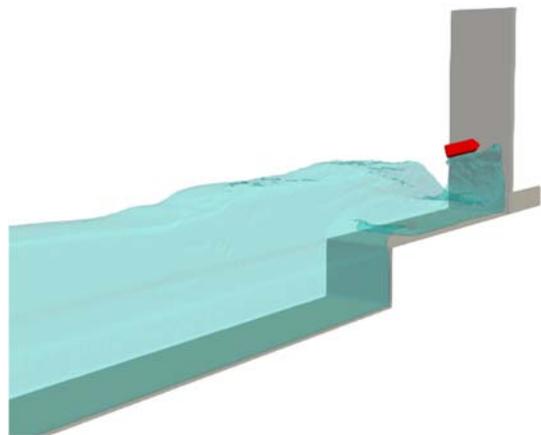
Time: 11.20 (s)



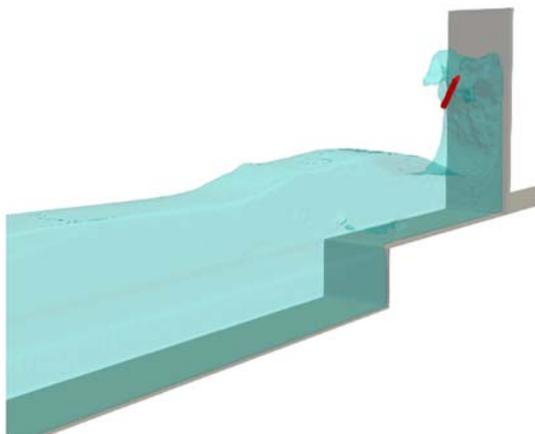
Time: 11.48 (s)



Time: 11.60 (s)



Time: 11.80 (s)



Time: 12.00 (s)

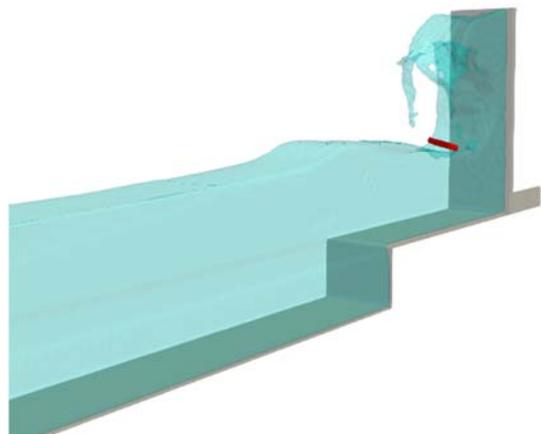


図-9.3.24 漂流物及び水面のシミュレーション結果 (F-We20-D-35) (2/2)

## 10. 黒津波が作用荷重に与える影響の検討

### 10.1. 既往文献調査

黒津波が防潮堤の作用荷重に与える影響および黒津波が発生する地理的条件及び津波の特性について、既往の文献調査を実施した。以下に概要を示し、各文献の詳細については、個別に後述する。ただし、水理実験や数値解析は、土砂に関するものがほとんどであり、非常に粒径の細かいヘドロ分を対象とする黒津波への適用には課題がある。

#### (1) 底質調査（ヘドロ分）

山下ら<sup>1)</sup>は神奈川県川崎市を対象として高橋ら<sup>6)</sup>の津波土砂移動モデルによる数値解析を行い、運河内で侵食の可能性が高い場所の底質調査（強熱減量，重金属，PCBなど）を実施し、津波による底質移動に起因した災害リスクを評価した。

#### (2) 土砂移動の水理実験

松富ら<sup>2)</sup>は水理実験により津波氾濫水の最大密度が  $1.2 \text{ g/cm}^3$  程度に達し得ることを実証し、最大密度が土砂の粒径分布や氾濫流量にほとんど依存しないことを確認した。さらに、松富ら<sup>3)</sup>は2015年の水理実験に基づき、津波遡上高（遡上距離），土砂堆積厚（空間分布含む），土砂堆積距離・津波遡上距離比（ $\leq 1$ ）の密度依存性を検討し、土砂堆積距離と津波遡上距離は大きく異なる場合があることを実証した。また、松富ら<sup>4)</sup>は2016年の水理実験に基づき、主要変量の津波氾濫水密度の水理量への依存性や遡上距離，土砂堆積距離と遡上距離の比（ $\leq 1$ ）や平均土砂堆積厚の氾濫水密度への依存性を定量的に検討し、氾濫水密度が入射フルード数（ $\sim$ シールズ数）と土砂粒径に依存することを示した。

#### (3) 土砂移動の数値計算

藤井ら<sup>5)</sup>は全流砂量の一部がその場所での外力に一義的に支配される局所フラックスとして挙動し、残りが浮遊成分として単層の移流拡散方程式に従って挙動する局所フラックス・移流拡散混合モデルを導入しており、津波の非定常性に伴う高圧力勾配下での底面せん断力に着目して無次元掃流力（シールズ数）の算定方法を改良した。また、高橋ら<sup>6)</sup>は掃流砂と浮遊砂を独立に取り扱い、浮遊砂濃度が非平衡な状態においても適用可能な津波を対象とした土砂移動モデルの提案を行い、掃流層内で流砂運動が完結する掃流砂量に加え、掃流砂層と浮遊砂層間の砂の巻上げと沈降から構成される交換砂量を導入した。山下ら<sup>7)</sup>は南海トラフ巨大地震の津波リスクが最も高い高知県土佐湾を対象に、高橋ら<sup>6)</sup>モデルを用いて広域津波土砂移動の数値シミュレーションを実施し、3種類の底質を想定して津波による地形変化が生じやすい地域や地形変化による潜在的な影響として津波ハザードの変化傾向を検討した。松富<sup>8)</sup>は津波氾濫水密度の簡易評価モデルを構築し、2015～2019年に実施した水理実験の結果に適用することで、氾濫水密度は入射フルード数と土砂粒径に依存し、入射フルード数が小さく（土砂粒径が大きく）なれば、氾濫水密度が小さくなることを理論的に示した。

以上の文献は、主に土砂を対象としたものであるが、黒津波の作用荷重を対象としたものとして以下が挙げられる。

#### (1) 水理実験

松富ら<sup>9)</sup>は有限幅の RC 造建築物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存を土砂水と清水を用いた水理実験を通して実証し、前面浸水深や前面浸水深係数が同じ場合には土砂水による水平力が顕著に大きいことを示した。さらに、松富ら<sup>10)</sup>は 2018 年の水理実験に基づき、津波周期が十分に長い条件下で土砂水と清水を用いた津波荷重実験を行い、氾濫水密度と波周期の津波荷重への影響を検討し、氾濫水密度が高くなれば波周期に関係なく水平力が大きくなることを示した。一方、中村ら<sup>11)</sup>は浮遊砂を含むことによる流れの構造変化（密度と粘性の変化）のうち粘度の変化に着目し、粘度の浮遊砂濃度依存性だけでなく、せん断応力依存性も考慮した評価式の提案を行うため、粘土（カオリン）の懸濁液を用いた粘度計による実験を行った。

## (2) 数値計算

さらに、中村ら<sup>12)</sup>は 2015 年の成果に加えてベントナイトと珪砂の懸濁液も含めた同様の実験から粘性係数の評価式の精度向上を図り、浮遊砂による水の密度変化を 3 次元流体・構造・地形変化・地盤連成数値計算モデルに組み込んで、一様流や津波の遡上現象に適用することで浮遊砂の影響を検討した。その結果、津波の準定常的な持続波圧で最大波力が生じる場合には、浮遊砂による密度と粘性係数をともに考慮することで最大波力が増加する現象が確認された。

## (5) その他

門廻ら<sup>13)</sup>は宮城県気仙沼湾周辺を対象に、郵便番号ごとの犠牲者数・犠牲率を求め、津波氾濫・土砂移動計算の結果から、最大浸水深・最大流速・浮遊砂濃度と犠牲率に相関があることを示した。また、NHK<sup>14)</sup>では 2011 年東日本大震災時に採取された黒津波の主成分であるヘドロから密度 1,130 g/L、平均粒径 7  $\mu$  m が確認され、水理実験から津波氾濫密度を約 10%大きくした場合に津波波力が約 2.17 倍の大きさになることが示された。また、津波は湾の狭くなった場所に差し掛かると行き場を失って、通り道を広げようと海底を削るため、これが黒津波となることを指摘し、気仙沼湾の解析の例では湾に入る水量が 20%増加したことを示した。

各既往文献の詳細を、以降に示す。

### 10.1.1. 黒津波の発生条件

#### (1) 底質調査

山下ら (2019)<sup>1)</sup>: 臨海都市部における津波による底質移動に起因した災害リスク評価に向けて

##### 【概要】

臨海都市部の津波による底質移動に起因した災害リスク評価や課題の検討に向けて、神奈川県川崎市における運河内の底質調査を実施し、最大クラスの津波による運河海底の侵食可能性やその影響を津波土砂移動シミュレーションに基づき推定した。

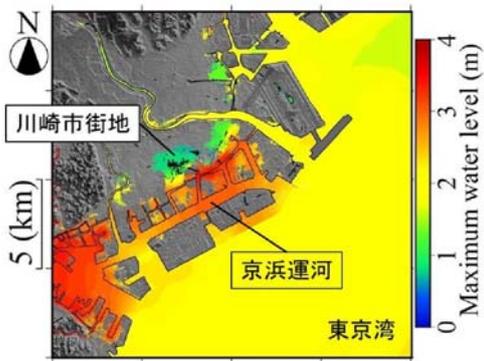
津波による土砂移動シミュレーションでは、川崎市臨海域における想定最大クラスの慶長型地震 (Mw8.5) および元禄関東地震 (Mw8.5) による津波を解析対象とした。高橋ら (1999)<sup>6)</sup>の津波土砂移動モデルに基づき、10m メッシュで水域と陸域をそれぞれ可侵食域と非侵食域にした。既往調査によると運河内の底質はシルト分が卓越するが、ここでは採用した流砂量式の既存パラメタに対してほぼ最小値である 0.1mm を代表粒径としてシミュレートした。その結果、土砂移動を考慮しない場合と比べて水位の僅かな増加が市街地で見られる。また、運河内の侵食傾向は両地震で類似した結果となった。

底質調査では、上記のシミュレーション結果から侵食域や土砂移動の影響に基づき 4 地点 (水深 5~15m 程度) を選び、調査船によりエクスマンバージ採泥器を投入して海底表層の堆積物を採取した (各地点 3 回, 計 12 試料)。採取した試料は過酸化水素水にて有機物を除去し、レーザー式粒度分析計にて試料毎の粒度を測定した。また、各地点 3 つの試料を等量混合したものを供試料として底質成分を分析した。本研究では環境省が実施した東日本大震災の津波堆積物の分析内容を参考にし、強熱減量、重金属、PCB の含有量を分析項目として底質の打ち上げによる環境リスクを評価した。その結果、表-10.1 に示す通り、運河奥部の地点 A と A' では有機物、重金属および PCB の含有量が高く、粒度が小さい。特に、鉛、セレン、砒素、PCB の有害物質含有量は、東日本大震災の最大値と同程度、もしくは、それ以上であった。底質の有害物質は浸水時の拡散で希釈されて堆積することも考えられるが、臨海部での津波堆積物による潜在的な災害リスクとして捉える必要がある。

表- 10.1 本調査による底質と環境省による東日本大震災津波堆積物の分析結果

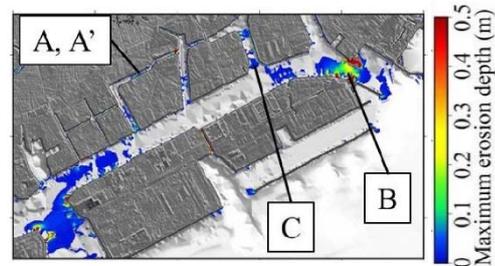
(成分分析値は乾燥試料中の濃度. 環境省による土壤環境基準は平成 15 年環境省告示 19 号準拠)

分析項目	川崎市臨海部の底質				東日本大震災の津波堆積物(環境省調べ)		環境省が定める 底質の暫定除去基準(1)と 土壤環境基準(2)
	A	A'	B	C	例: 気仙沼市	最大値	
強熱減量(%)	15	16	7.7	6.0	7.1-16.0	21.8 (石巻市大門町)	(なし) 「なし」
カドミウム(mg/kg)	5.7	6.0	1.1	0.5	< 10	< 10	(なし) 「150」
鉛(mg/kg)	760	850	8.1	28	18-23	680 (岩沼市下野郷)	(なし) 「150」
セレン(mg/kg)	13	13	0.6	0.7	< 10	< 10	(なし) 「150」
総水銀(mg/kg)	7.2	7.8	1.0	0.35	< 10	< 10	(25 ※河川・湖沼) 「15」
ヒ素(mg/kg)	180	180	16	10	< 10	18 (志津川夕見町) ※土屋ら(2012)の調査結果は次の通り: 岩手岩泉46、気仙沼本吉2200、東松島市31、岩沼市41	(なし) 「150」
PCB(mg/kg)	0.66	0.60	0.43	0.02	0.016-0.026	0.18 (石巻市大門町)	(10) 「定量限界値」
メディアン径( $\mu\text{m}$ )	16-55	18-31	55-114	22-48	16-23 ※細粒分(< 75 $\mu\text{m}$ )は11-27%である	—	—



左図: 最高水位分布(土砂移動を考慮した慶長型津波)

下図: 川崎市臨海域の最大侵食深分布(慶長型津波)



## (2) 土砂移動の水理実験

松富ら (2015)<sup>2)</sup>: 津波氾濫流の密度に関する基礎実験

### 【概要】

津波荷重に対して線形的に影響を及ぼす津波氾濫水の密度の最大値を初歩的であるが、工夫した水理実験に基づいて検討した。また、最大密度の諸項目（実験前の土砂の粒径分布、氾濫水の採取量、氾濫流量）への依存性や、実験前の土砂と氾濫水中の土砂の粒径分布についても検討した。

図- 10.1 の通り、実験水路は簡易に高シールズ数を確保するため、すべり台状の開水路とした。ただし、すべり台の下端には土砂を敷き詰める水平水路部を設け、下流部には土砂を含んだ氾濫水を採水するために緩い上り勾配のジャンプ台を接続した。また、すべり台の斜面と水平水路部を滑らかに接続するため、両者の接続部に曲面部を設けた。

津波氾濫流はすべり台上端の水平部にゲート付きの貯水槽を設置し、ゲート急開流れて模擬した。氾濫水はすべり台を流下し、水平水路部に敷き詰められた土砂を巻き込み、下流端の緩勾配のジャンプ台を駆け上がって空中に飛び出す。このときに飛び出した土砂を含む氾濫水の一部は、落下位置に設置したメスシリンダー群（手前に傾斜角  $45^\circ$ 、内径  $40\text{mm}$ 、秤量  $250\text{cm}^3$  のメスシリンダーを流れ方向に 5 本、水路横断方向に 8 本の合計 40 本）にて採水される。これにより、氾濫水の密度とその空間分布が評価できる。また、水平水路部の流況観察と氾濫流先端の移動速度を評価するため、水平水路部にてスケールを並置し、斜め上方からビデオ撮影を行った。なお、本実験には粒度に大差がない 4 種類の土砂を使用し、実験回数は各ケース 1 回とした。

本研究により得られた主な結果は次の通りである。

- ①本実験の氾濫流が津波氾濫流と大きく異なっている可能性があるが、氾濫水の最大密度が  $1.2\text{g/cm}^3$  程度に達し得ることを実証した。
- ②本実験の範囲では、最大密度は実験前の土砂の粒径分布、氾濫水の採取量や氾濫流量にほとんど依存しないことを確認した。
- ③実験前の土砂と氾濫水中の土砂の粒径分布に大差は認められなかったが、氾濫水中の土砂の方が細粒分はやや少ない傾向にあった。

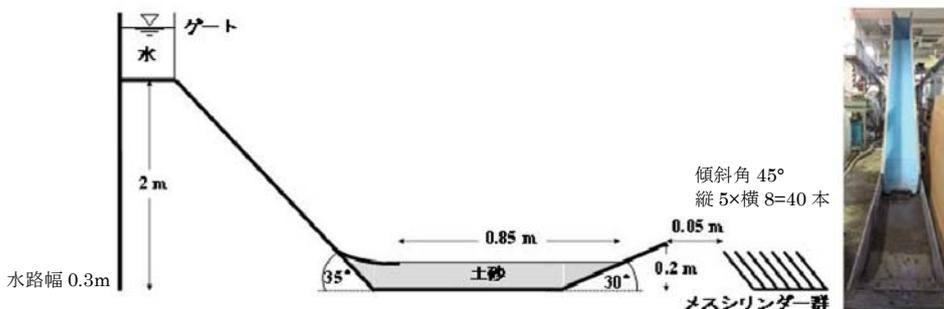


図- 10.1 実験水路の概略、正面写真（右端）と測定器具の配置 [2015 年]

松富ら (2016) <sup>3)</sup>: 津波氾濫水密度の土砂堆積や遡上高への影響

【概要】

2015年の水理実験に基づいて、歴史津波の規模評価に影響を及ぼす津波遡上高(遡上距離)、土砂堆積厚(空間分布含む)、土砂堆積距離・津波遡上距離比( $\leq 1$ )の密度依存性を検討した。

2015年と同様に、実験水路は簡易に高シールズ数を得るため、すべり台状の開水路とした。ただし、すべり台の高さや傾斜角などの各諸元は図-10.2の通りに変更した。また、津波氾濫流の遡上実験では、緩勾配のジャンプ台に続き粒径 $850\sim 2000\mu\text{m}$ の砂を貼り付けて粗度を高めた不透水の緩斜面を設けた。本実験には粒度特性に大差のない4種類の土砂を使用し、初期土砂厚の調整で氾濫水密度を変化させた。

氾濫水の密度実験では2015年の実験と同様に、土砂を巻き込んだ氾濫水が水路下流端のジャンプ台から飛び出し、落下位置に設置したメスシリンダー群(手前に傾斜角 $45^\circ$ 、内径 $40\text{mm}$ 、秤量 $250\text{cm}^3$ のメスシリンダーを流れ方向に8本、水路横断方向に8本の合計64本)で採水した。土砂堆積・遡上高(遡上距離)の実験では、土砂を含んだ氾濫水が一樣勾配の緩斜面を遡上して舌状の土砂堆積域となり、流れ方向に $5\text{cm}$ 間隔、横断方向に8等分(9測点)をポイントゲージで格子状に堆積厚を測定した。堆積土砂の粒度は舌状部の付け根部、中央の横断部と水路中央縦断部から評価した。なお、各実験の回数はケース毎に1回とした。本研究により得られた主な結果は次の通りである。

- ① 氾濫水密度(初期土砂厚)が高(厚)くなれば、遡上高(遡上距離)は低(短)く、平均土砂堆積厚は厚くなることを実証したが、実際の遡上高は地形やその変化しやすさとの兼合いに依存すると推察された。
- ② 土砂堆積距離と津波遡上距離は大きく異なる場合があることを実証し、前者のみに基づく歴史津波の規模推定には過小評価の危険があることを指摘した。
- ③ 氾濫水密度実験における実験前土砂と氾濫水土砂、土砂堆積・遡上高実験における遡上堆積土砂の粒度に大差はないが、堆積土砂で細粒分がやや少ない傾向にあった。これは、氾濫水の遡上により、ほぼ満遍なく土砂が移動・堆積したことを示唆している。
- ④ 氾濫水の最大密度は水理量に依存すると言える。
- ⑤ 津波氾濫計算では、より正確な津波荷重や氾濫域の評価のため、氾濫水密度の考慮が必要な場合がある。

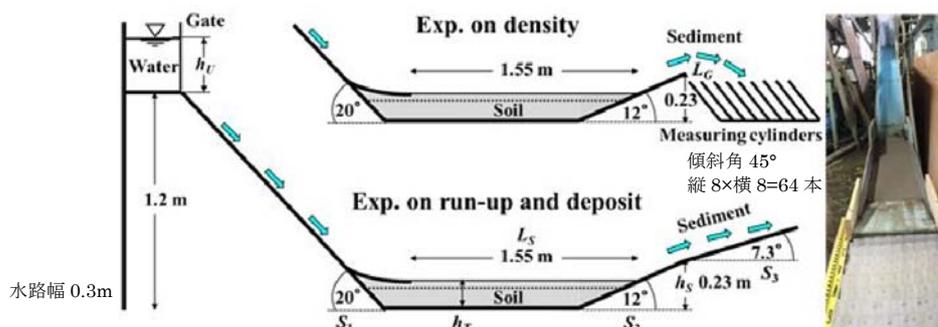


図-10.2 実験水路の概略、正面写真(右端)と測定器具の配置 [2016年]

松富ら (2017) <sup>4)</sup>: 津波氾濫水密度とその遡上距離や土砂堆積への影響に関する定量実験

【概要】

津波の荷重評価や規模評価の高度化を目指して、主要変量の津波氾濫水密度の水量への依存性や遡上距離、土砂堆積距離と遡上距離の比 ( $\leq 1$ ) や平均土砂堆積厚の氾濫水密度への依存性を工夫した水理実験に基づいて定量的に検討した。

実験装置は 2016 年の水理実験と同様にすべり台状の開水路とし、各諸元は図-10.3 に示す通りとした。水量の測定では初期土砂層域の上下流端に超音波式水位計を設置し、水位計間の距離を 1.65m、各水位計位置の水路底面位置は同じとした。また、氾濫流にマッハ波を形成させ、マッハ角から入射氾濫流のフルード数 (以下、入射フルード数) や氾濫流速を評価するため、初期土砂層域中心部の土砂層表面から 1.5cm 上方にポイントゲージの先端と、その横の水路側壁に横幅 0.2cm かつ奥行 0.4cm の水路底面まで達する微小角柱を設置した。さらに、ポイントゲージ設置位置での非先端部の氾濫水深、マッハ角を評価するため、水平水路部と緩斜面沿いにスケールを配置し、上方や側方からビデオ撮影を行った。なお、入射フルード数と氾濫流速は次の 3 方法で評価した。第 1 法は上方と側方からのビデオ撮影により得られるマッハ角 (微小角柱) と非先端部の氾濫水深を用いる方法、第 2 法は上方と側方からのビデオ撮影により得られるマッハ角 (ポイントゲージ) と非先端部の氾濫水深を用いる方法、第 3 法は側方からのビデオ撮影により得られる非先端部の氾濫水深と氾濫流先端移動速度 ( $\equiv$  氾濫流速と仮定) を用いる方法である。また、実験回数は各ケース 1 回とした。

本研究により得られた主な結果は次の通りである。

- ① 氾濫水密度は入射フルード数 (～シールス数) と土砂粒径に依存することを示した。
- ② 2016 年の実験条件を変え、氾濫水密度の実験値域を拡げることで既報近似式の有用性を確認するとともに、よりよく実験値に適合する近似式を提案した。
- ③ 氾濫水密度が高くなるほど、土砂堆積距離・遡上距離比が小さくなることを新たに示した。
- ④ 実験前土砂、メスシリンダーで採取した氾濫水土砂と緩斜面上に堆積した土砂の粒度はこれまで以上に大差がなかった。これは氾濫流で使用土砂の各粒径成分が粒径の大小に関係なく移動し、堆積したことを示している。

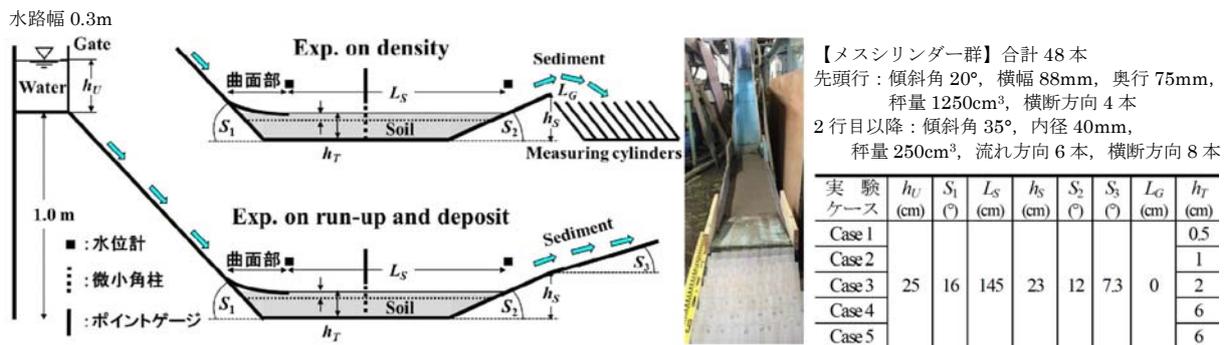


図-10.3 実験水路の概略、正面写真 (右端) と測定器具の配置 [2017 年]

### (3) 土砂移動の数値計算

藤井ら (1998) <sup>5)</sup>: 津波による海底地形変化に関する研究

#### 【概要】

津波による海底地形変化について検討するための課題として、①外力および砂移動の程度が大きいため用いるべき流砂量則自体に検討の必要があるという問題、②外力が空間的に急激に変化する場所では非平衡性が卓越し局所流砂量則のみでは現象を十分に表現できないという問題が挙げられる。本研究では、これらの課題に対し、①大きなシールズ数を発生させた移動床実験および現地データに対する検証、②狭窄部を有する開水路での移動床実験を実施することにより、津波の外力特性を反映した地形変化モデルについて検討した。

非平衡場での実験では、図・10.4 に示す海底形状として循環流装置付きの2次元水槽（長さ47m×幅0.8m×深さ1.5m）を用い、長周期（100秒）の流れと高シールズ数（10程度）を発生させた。実験は外力場と詳細に把握するため固定床実験（①～⑬で水位・流速計測）と、地形変化を計測するため移動床実験（測線1～3で地形変化量計測）を実施した。なお、実験に用いた底質は、豊浦標準砂（中央粒径  $d=0.075\text{mm}$ 、比重=2.65）である。

実験に基づく地形変化モデルの検討から、流砂量  $q$  はシールズ数  $\psi$  の1.5乗に比例した式(1)、摩擦速度  $u^*$  は流速分布の log-wake 則を鉛直方向に積分した式(2)が、実験結果を良好に再現できた。

$$q = A_1 \psi^{1.5} (sgd^3)^{0.5} \quad (1)$$

$$u^* = \frac{U}{\left\{ \left( \frac{1}{\kappa} \right) \ln \left( \frac{\delta}{ks} \right) + A_r - \left( \frac{\delta}{h\kappa} \right) + \left( 2 - \frac{\delta}{h} \right) \left( \frac{\Pi}{\kappa} \right) \right\}} \quad (2)$$

ここで、 $s$ : 底質の水中比重、 $g$ : 重力加速度、 $d$ : 底質の粒径、 $A_1$ : 係数、 $\kappa$ : カルマン定数 (=0.4)、 $U$ : 鉛直平均流速、 $h$ : 水深、 $ks$ : 相当粗度、 $\delta$ : 境界層厚、 $\Pi$  および  $A_r$ : 対数則からのずれ(wake)の大きさを表すウェイクパラメータおよび積分定数である。

本研究では、全流砂量の一部がその場所での外力に一義的に支配される局所フラックスとして挙動し、残りが浮遊成分として単層の移流拡散方程式に従って挙動する局所フラックス・移流拡散混合モデル（以後、混合モデルとする）を導入した。このモデルでは浮遊砂濃度の鉛直分布に関する非平衡性までは考慮できないが、外力の急変に対する全流砂量フラックスの追従の遅れによって現れる非平衡性は考慮できる。混合モデルは式(3)の浮遊砂濃度連続式と式(4)の海底地盤高連続式からなる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} = \frac{E - wC_b}{h + \eta} \quad (3)$$

$$\rho_s(1 - \lambda) \frac{\partial \eta_b}{\partial t} + E - wC_b + \alpha \rho_s(1 - \lambda) \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $C$ : 鉛直平均濃度、 $E$ : 巻き上げ率、 $w$ : 沈降速度、 $C_b$ : 底面濃度、 $\eta$ : 水位、 $\eta_b$ : 地盤高、 $\alpha$ : 局所的な外力のみに移動を支配される成分が全流砂量に占める比率である。本モデルは、浮遊砂濃度の鉛直分布を規定する鉛直拡散係数が大きいほど、また移流フラックス成分の比率が大きいほど非平衡性の効果が大きく現れる。そこで、鉛直拡散係数中の未定

定数と局所フラックス率 $\alpha$ について、非平衡場のち地形変化実験に対して良好な再現性が得られるように適切な値を検討し、設定できた。

上記実験で再現性が検証された海底地形変化モデルを用いて、1960年チリ津波時の気仙沼湾における地形変化事例に適用し、再現計算を実施した。その結果、混合モデルによる計算で堆積侵食の分布パターンの良い再現性が得られた。

本研究により得られた成果を以下に述べる。

- ① 次元水槽を用いた津波時移動床実験に基づいて流砂量式、底面せん断応力ならびに混合モデルについて検討し、地形変化予測モデルを構築した。
- ② 予測モデルの有効性を確認するため、現地地形変化事例に対する検証を実施した結果、非平衡性が強い場においても良好に再現できる海底地形変化予測モデルが提案できた。

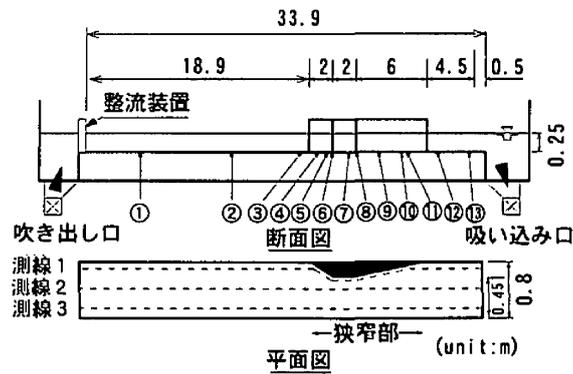


図-10.4 非平衡場での実験に用いた模擬海底形状

## 高橋ら（1999）<sup>6)</sup>：掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発

### 【概要】

津波による土砂移動を定量的に評価する解析手法に関して、従来のモデルでは全流砂量を局所フラックス的に求め、また平衡の浮遊砂濃度分布を仮定しており、大きな乱れのため浮遊砂が卓越する非定常性の強い津波を再現するには問題があった。そこで本研究では、掃流砂と浮遊砂を独立に取り扱い、浮遊砂濃度が非平衡な状態においても適用可能な津波を対象とした土砂移動モデルの提案を行った。

本モデルの概念図を図-10.5に示す。ここで、 $\rho_s$ ：砂粒の密度、 $\lambda$ ：砂粒の空隙率、 $Z_B$ ：基準面からの底面高さ、 $q_B$ ：掃流砂量、 $\varepsilon_B$ ：鉛直方向の拡散係数、 $C$ ：掃流砂層と浮遊砂層の境界付近の濃度、 $w_0$ ：砂粒の沈降速度、 $\bar{C}_B$ ：平均掃流砂層濃度、 $h_B$ ：掃流砂層厚、 $\bar{C}_S$ ：平均浮遊砂層濃度、 $h_S$ ：浮遊砂層厚、 $M$ ：流量フラックスである。

単位幅の微小区間  $\delta x$  における微小時間  $\delta t$  での流砂の出入りと内部の変化から質量保存を考える。流砂層内においては、(a) 底面との交換砂量（底面の侵食・堆積）、(b) 流下方向への掃流形態で移動する流砂量の収支、(c) 拡散により浮遊層へ巻き上げられる流砂フラックス、(d) 重力により浮遊層から沈降してくる流砂フラックス、(e) 掃流層内の流砂量の増減（掃流濃度の増減）が釣り合うことにより、流砂の連続式が得られる。本研究では、拡散による巻上フラックスと重力による沈降フラックスの収支を「掃流砂層と浮遊砂層間の交換砂量  $w_{ex}$ 」として式(1)のように新たに定義した。

$$w_{ex} = \varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} - w_0 C \quad \text{式(1)}$$

これを導入し、掃流砂層濃度や掃流砂層厚の時間変化は比較的小さいと仮定して、本モデルの掃流砂層の連続式を式(2)に示す。また、浮遊砂層の連続式を式(3)に示す。

$$\frac{\partial Z_B}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{\partial q_B}{\partial x} + w_{ex} \right) = 0 \quad \text{式(2)}$$

$$\frac{\partial \bar{C}_S M}{\partial x} - w_{ex} + \frac{\partial \bar{C}_S h_S}{\partial t} = 0 \quad \text{式(3)}$$

なお、掃流砂量  $q_B$  と掃流砂層・浮遊砂層の交換砂量  $w_{ex}$  を水理実験により設定した。実験装置は図-10.6に示す通り、大容量のヘッドタンクを高所に設置して管路に接続し、管路内に砂床区間を設け、豊浦標準砂を敷き詰めた。管路終端には掃流砂用のトラップを設けて、掃流形態と浮遊形態で運搬される土砂を分離して測定した。本実験では、固定床条件で流速とシールズ数の関係、移動床条件で流速と掃流砂量および交換砂量の関係を求め、シールズ数と流砂量の関係を導いた。

本モデルを検証するため、1960年チリ地震津波来襲時の気仙沼湾を対象として数値計算を行った。その結果、本モデルが従来モデルよりも侵食堆積パターンの再現性向上が見られたが、変動量としては過小評価となった。

本研究により得られた成果を以下に述べる。

- ①津波による流砂現象を掃流砂層と浮遊砂層に分け、両層間の交換砂量と浮遊砂フラックスを導入してモデル化を行った。モデル化に際して必要となる掃流砂量式と交換砂量式

は、津波を想定した水理実験により求めた。提案モデルは、非平衡の浮遊砂濃度条件への適用が可能であり、掃流力の変化に対する浮遊砂濃度変化の遅れも再現された。  
 ②モデル検証のため数値計算を実施した結果、従来の局所フラックスモデルとの比較から、再現性の向上が確認された。

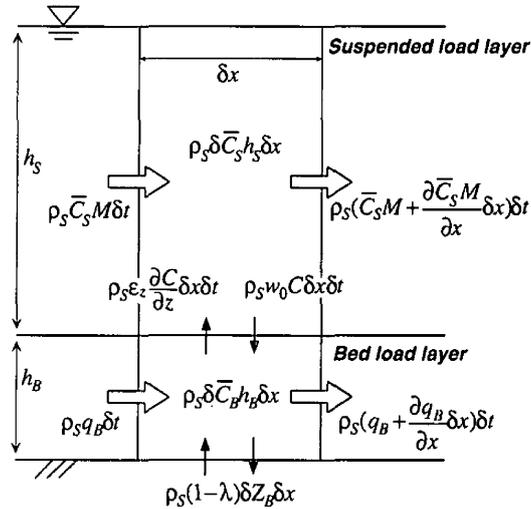


図-10.5 掃流砂層・浮遊砂層分離モデルの概念図

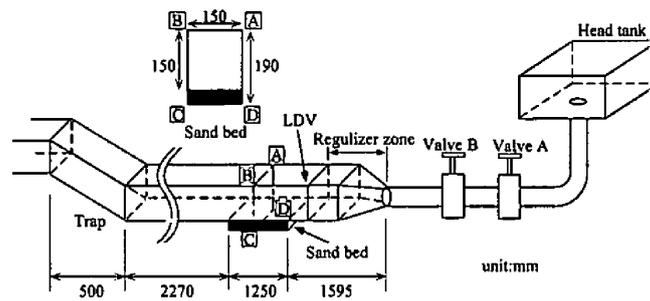


図-10.6 実験装置

### 【藤井ら<sup>5)</sup>モデルと高橋ら<sup>6)</sup>モデルとの違い】

藤井ら<sup>5)</sup>と高橋ら<sup>6)</sup>のどちらも、津波による土砂移動を模擬した水理実験結果と1960年チリ津波において宮城県気仙沼湾にて得られた実績の地形変動結果を活用して、津波移動床モデルの提案を行っている。

藤井ら<sup>5)</sup>モデルでは、津波の非定常性に伴う高圧力勾配下での底面せん断力に着目し、無次元掃流力（シールズ数）の算定方法を改良している点が大きな特徴である。また、藤井ら<sup>5)</sup>モデルは、乱流拡散係数が鉛直方向に一様で、さらに浮遊砂層中では巻上量が沈降量と一致する平衡状態を仮定し、海底から離れるにつれて指数的に減少する濃度分布を用いている。しかし、一様な壁面境界層乱流中では乱流拡散係数は底面からの距離に反比例すること、さらに浮遊砂の供給が局所的な変化（例えば、地形が複雑に変化する場所）の場合には浮遊砂濃度の鉛直分布は局所的に異なることから、上記の仮定は不十分と考えられる。

高橋ら<sup>6)</sup>モデルでは、津波特有の現象である大量の砂の巻上げと沈降との非平衡性を考慮できるように、掃流砂層と浮遊砂層を独立して扱い、掃流層内で流砂運動が完結する掃流砂量に加え、掃流砂層と浮遊砂層間の砂の巻上げと沈降から構成される交換砂量を導入していることが大きな特徴である。また、高橋ら<sup>6)</sup>モデルはせん断応力の計算に **Manning** 則を用いているが、全水深が小さい場合に底面でのせん断応力を過大に評価する傾向があり、特に遡上時にはこの傾向が強くなる。そのため、津波堆積物のシミュレーションにおいてはせん断応力の計算方法を見直し、流速の鉛直分布を考慮することが必要であると考えられる。

## 山下ら (2019) <sup>7)</sup>: 高知県における最大クラスの津波による地形変化と潜在的影響の評価

### 【概要】

本研究では、南海トラフ巨大地震の津波リスクが最も高い高知県を対象に、土佐湾の東西約 85km にわたる広域津波土砂移動の数値シミュレーションを実施した。そして、3種類の底質を想定して津波による地形変化が生じやすい地域や、その地形変化による潜在的な影響として津波ハザードの変化傾向を検討した。

津波と土砂移動の時間発展計算には、高橋ら <sup>6)</sup>の津波土砂移動モデルを使用した。なお、本モデルに底面土砂の巻き上げに関わる底面せん断流によるエネルギー散逸は含まれるが、浮遊砂流れにおける海水密度や見かけの粘性の増加は考慮されない。すなわち、本計算は地形変化に伴う浸水量変化が及ぼす津波ハザードへの影響を評価するものである。津波波源データは内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」公表のケース④を対象とし、地形データは内閣府が公開する DEM を計算地形データに使用して 2430~10m の空間解像度を有する 6階層のネスティング計算を行う。底質条件は、既往実験による粒径依存パラメタに対する中央粒径  $d_{50}$  を代表粒径として、 $d_{50}=0.166, 0.267, 0.394\text{mm}$  の計 3 パターンを想定した（順番にケース A, B, C とし、土砂移動なしのケースを D とした）。

数値シミュレーションの結果のうち、図- 10.7 に地形変化による最高水位および最高浸水高の変化量を示す。ここで、(b)は土砂移動の考慮有無による最高浸水高の変化量を示しており、最小粒径が小さいケース A では最大 2m もの浸水高の増加が確認できた。

本研究により得られた成果を以下に述べる。

- ①広域津波土砂移動の数値シミュレーションの結果、特定の場所で大規模な地形変化が起こることが示唆され、砂資源の沖合流出のほか、東日本大震災以上の災害土砂の打上げが懸念された。
- ②別の場所では、顕著な地盤侵食による背後への津波流入量の増加が原因と考えられる浸水範囲拡大や浸水高増大の可能性が示唆された。特に、砂地盤が細かい粒径で構成される場合、固定地盤の予想最高浸水高より 2m 程度増加する地域があることを予測した。
- ③地形変化と潜在的影響は底質粒径による不確実性が認められるものの、湾広域での特徴を把握できた。

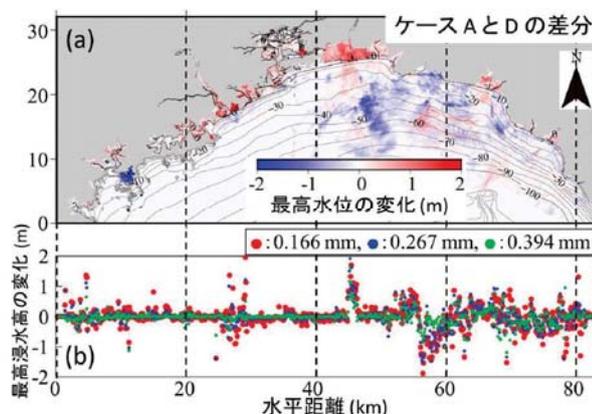


図- 10.7 地形変化による最高水位(a)および最高浸水高(b)の変化量

## 松富（2019）<sup>8)</sup>：津波氾濫水密度の簡易評価法

### 【概要】

津波氾濫水密度の簡易評価モデルを新規に構築し、その評価モデルを2015～2018年の実験結果に適用して、津波氾濫水密度の評価法を提示するとともにその知見の充実を図った。津波氾濫水密度の評価モデル構築の第一段階として実験的検証の容易性から土砂の流水断面平均濃度を対象とし、掃流土砂と浮遊土砂を分離せずに全流送土砂で論じる点に本評価法の特徴がある。

土砂の密度を  $\rho_s$ 、清水または海水の密度を  $\rho_w$ 、単位幅・単位時間あたりの体積全流送土砂量を  $q_T$ 、入射津波の氾濫水深を  $h_i$ 、断面平均氾濫流速を  $u_i$ 、底面せん断応力を  $\tau_b$ 、重力加速度を  $g$  とする。ここで、単位幅・単位時間あたりの体積全流送土砂量  $q_T$  は式(1)で表される。

$$(\rho_s - \rho_w) g q_T \quad (1)$$

また、摩擦速度を  $u_*$  とすれば、入射氾濫流が底面の単位面積あたりにする仕事率は式(2)で表される。

$$\tau_b u_* \propto \tau_b u_i \quad (2)$$

この仕事率により全流送土砂重量の輸送が維持されるので、 $c_l$  を補正係数として式(3)が得られる。

$$(\rho_s - \rho_w) g q_T = c_l \tau_b u_i \quad (3)$$

一般的に定常流における流速係数  $u_i/u_*$  は固定床下や移動床下に限らず1より大きく、氾濫流による底面への仕事率の全てが全流送土砂重量の輸送維持に費やされるわけではないので、 $c_l$  は1より小さいと推定される。ただし、氾濫流（非定常流）における  $\tau_b$  の評価法（採用する抵抗則）次第では、 $c_l < 1$  とならないことも考えられる。

土砂の流水断面平均濃度  $C_m$  ( $\ll 1$ ) を導入すれば、単位幅・単位時間あたりの体積全流送土砂量  $q_T$  は式(4)のように表現される。

$$q_T = C_m h_i u_i \quad (4)$$

したがって、式(3)と式(4)から式(5)が得られる。

$$(\rho_s - \rho_w) g C_m h_i = c_l \tau_b \quad (5)$$

移動床下の氾濫流の抵抗則は不明であるが、移動床下の定常流のマニングの粗度係数  $n$  や摩擦損失係数  $f$  を導入すれば、 $\tau_b$  は式(6)のように表現される。

$$\tau_b = \frac{\rho g n^2}{h_i^{1/3}} u_i^2 = \frac{1}{8} \rho f u_i^2 \quad (6)$$

ここで、径深  $R \cong h_i$  としている。したがって、式(5)と式(6)から土砂の流水断面平均濃度として式(7)が得られる。

$$\begin{aligned} C_m &= c_l \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \frac{g n^2}{h_i^{1/3} g h_i} u_i^2 = c_l \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \frac{g n^2}{h_i^{1/3}} F_{ri}^2 \quad (7) \\ &= c_l \frac{f}{8} \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} F_{ri}^2 \end{aligned}$$

式(7)を氾濫水密度  $\rho$  の定義式（式(8)の第1行目）に代入して第一近似式を採用すれば、式(8)が得られる。

$$\rho = \rho_w \left\{ 1 + \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) C_m \right\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
&= \rho_w / \left( 1 - c_1 \frac{gn^2}{h_i^{1/3}} F_{ri}^2 \right) \\
&\cong \rho_w \left( 1 + c_1 \frac{gn^2}{h_i^{1/3}} F_{ri}^2 \right) = \rho_w \left( 1 + c_1 \frac{f}{8} F_{ri}^2 \right) \\
&= \rho_w (1 + a F_{ri}^2)
\end{aligned}$$

ここで、 $a$  は式(9)である。

$$\begin{aligned}
a &= c_1 \frac{gn^2}{h_i^{1/3}} = \frac{gn_M^2}{h_i^{1/3}} & (9) \\
&= c_1 \frac{f}{8} = \frac{f_M}{8}
\end{aligned}$$

式(8)から汜濫水密度は入射フルード数 ( $= u_i / \sqrt{gh_i}$ ) に強く依存することが分かる。式(9)の  $n_M$  は「移動床下の汜濫流のマニングの粗度係数」、 $f_M$  は「移動床下の汜濫流の摩擦損失係数」と呼ぶべきもので、 $c_1$  は移動床下の汜濫流と定常流における流水摩擦の違いを示すものと言える。

本研究により得られた主な結果は次の通りである。

- ① 汜濫水密度は入射フルード数と土砂粒径（中央粒径  $d_{50}$ ）に依存し、入射フルード数が小さく（土砂粒径が大きく）なれば、汜濫水密度が小さくなることを理論的に示した。これらの傾向は 2015～2018 年の実験結果と一致する。
- ② 本研究定義の移動床下の汜濫流の摩擦損失係数とマニングの粗度係数を例示した。これらの値はそれぞれ移動床下の定常流扱いによるものの平均的に 2 倍と 1.4 倍であった。
- ③ 移動床下の定常流の相当砂粒粗度として  $3d_{50}$ 、抵抗則として既存の広矩形開水路定常流の粗面則を採用し、これらから得られる摩擦損失係数を  $c_1$  倍、必要であればマニングの粗度係数を  $\sqrt{c_1}$  倍した値から汜濫水密度を評価する方法（簡易評価モデル）を提示した。
- ④ 土砂の流水断面平均濃度（ $\propto$  汜濫水密度）を測定する実験や推定する現地調査を実施するならば、本研究が提示する汜濫水密度評価法は津波汜濫流に限らず、土砂を含むいろいろな汜濫流（例えば、河川汜濫）に適用可能なものである。

## 10.1.2. 黒津波の作用荷重

### (1) 水理実験

松富ら（2018）<sup>9)</sup>：RC 造建築物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存に関する基礎実験

#### 【概要】

津波荷重評価の高度化へ向けた次の段階として、単純な形をした有限幅の RC 造建築物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存を土砂水と清水を用いた水理実験を通して実証した。

実験装置は図- 10.8 に示す通りとし、津波荷重・土砂堆積実験では上り斜面に続けて建築物模型を設置する水平部を設けた。建築物模型は開口部なしの単純な直方体 1 種類とし、水路横断中央に水路底面から 0.5cm 離して設置した。また模型縮尺 1/100 とし、諸元は図- 10.9 の通りである。なお、建築物模型への水平力と鉛直力は上部設置の分力計、模型周りの土砂堆積分布はポイントゲージでそれぞれ測定し、堆積土砂の粒度も評価した。土砂水と清水による建築物模型への津波荷重の比較は、前面浸水深や前面浸水深係数を同じにして検討した。氾濫水密度実験と土砂水による津波荷重実験・土砂堆積実験は各ケース 1 回、清水による津波荷重実験は各ケース 4 回行った。

本研究により得られた主な結果は次の通りである。

- ①RC 造建築物に作用する津波荷重が氾濫水密度に依存することを実験的に実証した。
- ②前面浸水深や前面浸水深係数が同じ場合、水平力は土砂水によるものが清水によるものより顕著に大きく、氾濫水密度が大きいほど水平力は大きかった。
- ③本実験の鉛直力は建築物周りの土砂堆積の影響を受け、清水によるものが土砂水によるものより大きくなることを示した。
- ④本実験では建築物周りの土砂堆積は建築物前面の水平力を受ける面積に影響しなかった。
- ⑤堆積土砂の粒径は建築物前面では氾濫前のものとほぼ同じで背面ではやや小さめである。

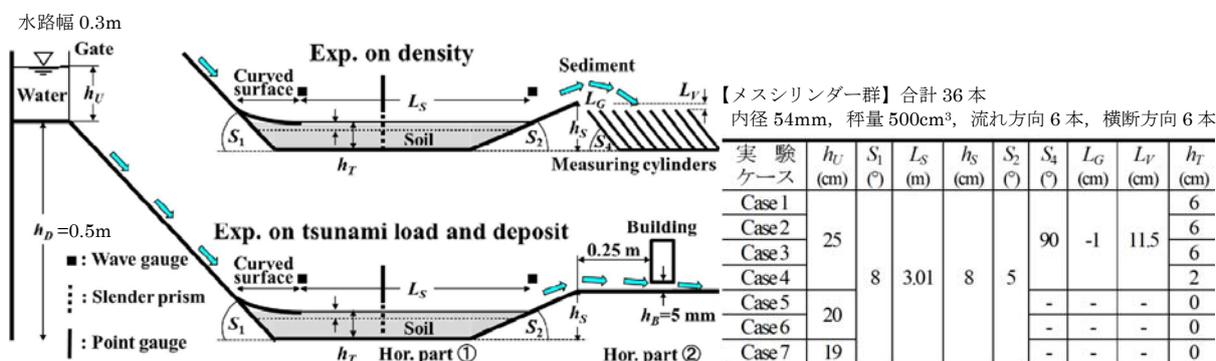


図- 10.8 実験水路の概略，正面写真（右端）と測定器具の配置 [2018 年]

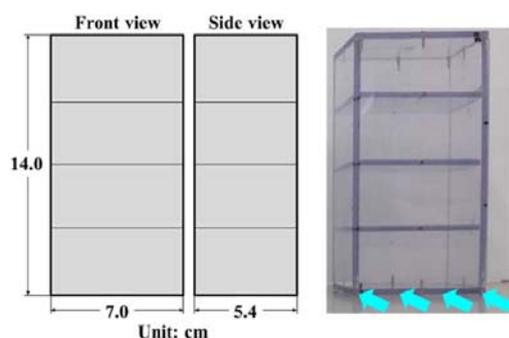


図- 10.9 建築物模型外形の諸元



写真- 10.11 建築物模型の設置状況・土砂堆積状況例

松富ら（2019）<sup>10</sup>：氾濫水密度と波周期の津波荷重への影響

【概要】

単純な形をした有限幅の RC 造建築物模型を対象に、2018 年の水理実験に比べて津波周期が十分に長い条件下で土砂水と清水を用いた津波荷重実験を行い、氾濫水密度と波周期の津波荷重への影響を検討した。

実験装置は図- 10.10、建築物模型は 2018 年実験と同様に図- 10.9 に示す通りとした。なお、本実験では水路の上流端の貯水槽の長さ  $L_U$  を 1.7m と 0.45m にし、波周期を 2 種類に設定した。なお、氾濫水密度実験と土砂水による津波荷重実験・土砂堆積実験は各ケース 1 回、清水による津波荷重実験は  $H_U=17\text{cm}$  を除き各ケース 2 回行った。

本研究により得られた主な結果は次の通りである。

- ①津波荷重の水平力は、氾濫水密度が高くなれば波周期に関係なく大きくなり、氾濫水密度が同じ場合には波周期が長くなれば密度による増大率は落ちるが水平力は大きくなる。
- ②津波荷重の鉛直力は、氾濫水密度が高くなれば波周期が長い場合には大きくなり、波周期が短い場合には建築物模型周りの土砂堆積の状況次第で小さくなる（土砂堆積が鉛直力に影響する）場合がある。
- ③2018 年実験との比較から、波周期や土砂粒径次第で土砂堆積状況は異なるが、土砂堆積が建築物前面の受圧面積に影響しないことを今回の実験でも実証した。

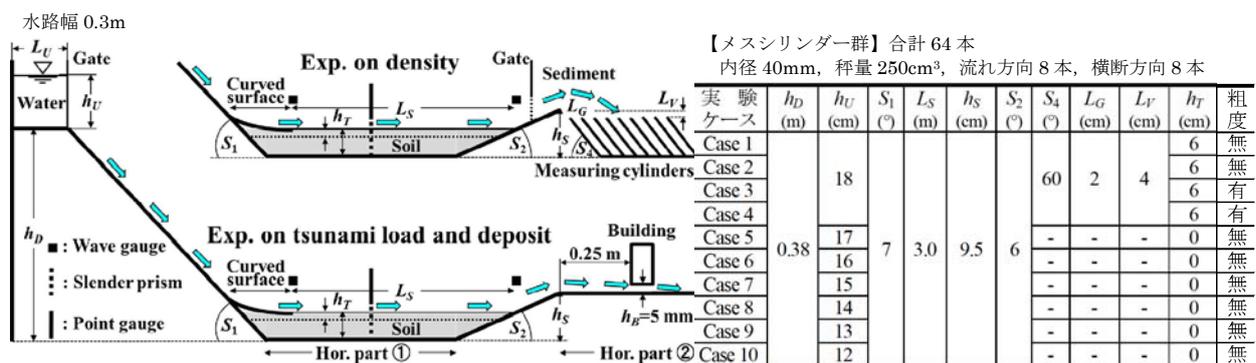


図- 10.10 実験水路の概略、正面写真（右端）と測定器具の配置 [2019 年]

## 中村ら (2015) <sup>11)</sup>: 高濃度の浮遊砂を含有した流体の粘度の測定とその評価

### 【概要】

本研究では、濁水状態の津波・海岸保全施設本体の挙動・基礎地盤の洗掘等の地形変化・基礎地盤の支持力の相互作用を解析できる数値計算モデルの構築に向けて、浮遊砂を含むことによる流れの構造変化（密度と粘性の変化）のうち粘度の変化に着目し、粘度の評価式に含まれるパラメタの同定を行った。

一般に、浮遊砂のような微粒子が懸濁している流体（以下、懸濁液とする）は非ニュートン特性を示し、粘度（粘性率、粘性係数） $\mu$  は浮遊砂濃度、せん断応力、温度、微粒子を構成する鉱物等の影響を受ける。本研究は、粘度 $\mu$ の浮遊砂濃度依存性だけでなく、せん断応力依存性も考慮した評価式の提案を行うため、粘度計を用いた実験を行った。

本実験では、懸濁状態を想定した測定液として溶媒が水、溶質が粘土（カオリン）の懸濁液を用い、表- 10.2 に示す条件下で計測を行った。

本研究により得られた主な結果は次の通りである。

- ①浮遊砂を含んだ濁水状態のとき、粘度 $\mu$ はせん断応力の増加とともに減少し、非ニュートン流体となることを確認した。
- ②浮遊砂濃度とせん断応力が与えられれば、本研究で得られた粘度の評価式に代入することで粘度 $\mu$ は推定できることを示した。ただし、鉱物種による粘度への影響などの課題が残される。

表- 10.2 2015年実験条件

浮遊砂濃度 $\phi$	回転速度 [rpm]	温度 [°C]	測定回数
0	12, 30, 60	20	3
0.03	12, 30, 60	20	3
0.05	6, 12, 30, 60	20	3
0.08	3, 6, 12, 30, 60	20	3
0.10	3, 6, 12, 30, 60	20	3
0.15	3, 6, 12, 30, 60	20	3
0.20	3, 6, 12, 30	20	3

## (2) 数値計算

### 中村ら（2016）<sup>12）</sup>：浮遊砂による流体の粘度の変化と一様流および津波による流動場に与える影響に関する研究

#### 【概要】

本研究では、浮遊砂を含んだ水の粘性係数の測定を 2015 年の成果に追加して実施し、粘性係数の評価式に含まれるパラメタの精度向上を図った。さらに、その評価式と浮遊砂による水の密度変化を 3 次元流体・構造・地形変化・地盤連成数値計算モデルに組み込むとともに、同モデルを一様流に適用して浮遊砂の影響を組み込んだ効果を既往研究との比較により検討した。その上で、同モデルを用いて実スケールの津波の遡上計算を実施し、遡上津波による浸水深、底面流速、作用波圧、作用波力に与える浮遊砂の影響を考究した。

粘性係数の測定実験では、表・10.3 に示す条件のもと 2015 年実験と同様に粘度計を用いて計測した。その結果、溶質によらず粘性係数を概ね評価することができた。しかし、カオリンに比べてベントナイトと 7 号珪砂は上記評価式の適用範囲が狭い等のため、カオリンの懸濁液を対象に数値計算モデルの改良を検討した。

浮遊砂（カオリン：粒子密度  $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、中央粒径  $1 \mu\text{m}$ ）による密度と粘性係数の変化の影響を組み込んだ効果を、一様流を対象として検討した。その結果、浮遊砂の粘性係数の変化を考慮したことで wake の流速が大きくなる現象が確認でき、既往研究と対応する結果が得られたため、数値計算モデルへの組み込みの妥当性を確認できた。

実スケールを対象とした津波の遡上現象の検討では、図・10.11 に示す計算領域で実施した。想定津波は押し波のみとし、長周期波（造波津波高 4m）を沖側の造波境界から入射させた。このとき、津波の継続時間を Wave A の 50s、Wave B の 150s の 2 パターンとし、浮遊砂による密度または粘性係数を 5 パターンに変化させて計算を行った。その結果、水位変動および底面流速に対して、浮遊砂による密度の方が粘性係数よりも影響が大きいことが判明した。また、陸上構造物に作用する波圧および波力に対して、準定常的な持続波圧により最大波力が生じる場合には浮遊砂による密度および粘性係数の影響をともに考慮することの重要性が示唆された。

本研究により得られた主な結果は次の通りである。

- ①懸濁液の溶媒が水、溶質がカオリン・ベントナイト・珪砂のとき、浮遊砂濃度とせん断応力が与えられれば、評価式から粘性係数が推定できることを示した。
- ②一様流への適用を通じて、浮遊砂による粘性係数の変化を考慮することで既往の研究と対応する結果が得られた。
- ③津波の遡上現象への適用を通じて、浮遊砂の影響の考慮の有無で遡上津波による水位変動、底面流速、作用波圧、作用波力が変化することが判明した。
- ④準定常的な持続波圧により最大波力が生じる場合には、浮遊砂による密度と粘性係数をともに考慮することで最大波力が増加する現象が確認できた。

表- 10.3 2016年実験条件

溶質	浮遊砂濃度 $\phi$	回転速度 [rpm]	温度 [°C]	使用ロータ
NA	0	12, 30, 60	20	低粘度アダプタ
カオリン	0.01	12, 30, 60	20	低粘度アダプタ
	0.02	12, 30, 60		
	0.03	12, 30, 60		
	0.04	12, 30, 60		
	0.05	6, 12, 30, 60		
	0.08	3, 6, 12, 30, 60		
	0.10	3, 6, 12, 30, 60		
	0.15	3, 6, 12, 30, 60		
ベン トナ イト	0.20	3, 6, 12, 30	20	低粘度アダプタ
	0.01	6, 12, 30, 60		
	0.03	6, 12, 30, 60		
	0.05	6, 12, 30, 60		
	0.08	6, 12, 30, 60		
7号 珪砂	0.10	3, 6, 12	20	低粘度アダプタ
	0.01	12, 30, 60		
	0.03	12, 30, 60		
	0.05	12, 30, 60		
	0.08	12, 30, 60		
	0.10	12, 30, 60		
	0.15	12, 30, 60		
0.18	12, 30, 60			
0.20	6, 12, 30, 60			

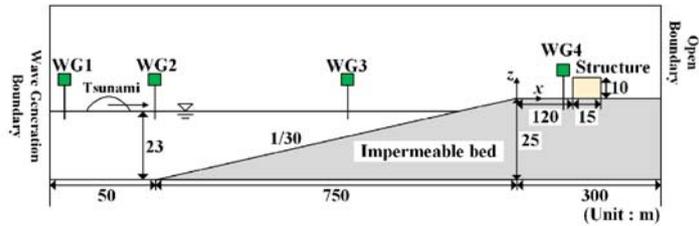


図- 10.11 計算領域の概略図 (津波)

### (3) その他

#### 門廻ら (2019) <sup>13)</sup>: 宮城県気仙沼市における震災データ活用による犠牲率と黒い津波外力との関係

##### 【概要】

宮城県気仙沼湾周辺を対象に、宮城県警から提供された震災データを用いて郵便番号ごとに犠牲者数および犠牲率を算出し、人的被害の空間的な特徴を把握した。その上で、黒い津波の外力である最大浸水深、最大流速および最大浮遊砂濃度と犠牲率の関係を検討するため、気仙沼湾における東日本大震災の津波氾濫・土砂移動計算を行った。その結果、最大浸水深および最大流速と犠牲率には正の相関が確認された。また、最大浮遊砂濃度と犠牲率にも相関があることが示された。

#### NHK (2019) <sup>14)</sup>: “黒い津波”～知られざる実像～

##### 【概要】

2011年東日本大震災時に採取された黒い津波の主成分であるヘドロは、密度 1,130 g/L、平均粒径  $7\mu\text{m}$  (最小  $4\mu\text{m}$ ) であった。なお、通常の海水密度は 1,030 g/L、黒い津波の密度は約 10% 大きい。濃い場所では密度が更に 20~30% 程度大きい可能性もある。

水に極めて細かい粒子を混ぜて密度を 1.1 倍にし、黒い津波を再現して壁に衝突する波力を水理実験で繰返し計測した。その結果、津波の波力が約 2.17 倍に大きくなった。原因は「波の形」にあり、黒い津波では波の下側で地面との摩擦で速度が遅く、抵抗がない上部の速度は速いため、波が立ち上がる形で壁に衝突したことから波力を増加させた。さらに、黒い津波では密度が大きい分、浮力も大きくなるため、建物などの漂流リスクも高くなる。また、津波は湾の狭くなった場所に差し掛かると行き場を失い、通り道を広げようと海底を削るため、これが黒津波となることを指摘し、気仙沼湾の解析の例では湾に入る水量が 20% 増加したことを示した。

## 参考文献

- 1) 山下 啓, 大石裕介, 古村孝志, 今村文彦: 臨海都市部における津波による底質移動に起因した災害リスク評価に向けて, *Coastal Engineering Journal* 投稿予定 (第 66 回海岸工学講演会 (2019) で発表).
- 2) 松富英夫, 川島 峻: 津波氾濫流の密度に関する基礎実験, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.71, No.2, pp.355-360, 2015.
- 3) 松富英夫, 今野史子, 齋川 聖, 鎌滝孝信, 渡邊一也: 津波氾濫水密度の土砂堆積や遡上高への影響, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.72, No.2, pp.397-402, 2016.
- 4) 松富英夫, 今野史子, 後村晃基, 今藤晃太, 鎌滝孝信, 渡邊一也: 津波氾濫水密度とその遡上距離や土砂堆積への影響に関する定量実験, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.73, No.2, pp.373-378, 2017.
- 5) 藤井直樹, 大森政則, 高尾 誠, 金山 進, 大谷英夫: 津波による海底地形変化に関する研究, *海岸工学論文集*, 第 45 巻, pp.376-380, 1998.
- 6) 高橋智幸, 首藤伸夫, 今村文彦, 浅井大輔: 掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, *海岸工学論文集*, 第 46 巻, pp.606-610, 1999.
- 7) 山下 啓, 菅原大助, 門廻充侍, 有川太郎, 高橋智幸, 今村文彦: 高知県における最大クラスの津波による地形変化と潜在的影響の評価, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.75, No.2, pp.685-690, 2019.
- 8) 松富英夫: 津波氾濫水密度の簡易評価法, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.75, No.2, pp.385-390, 2019.
- 9) 松富英夫, 岡田隼人, 久保田友寛, 今野史子: RC 造建築物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存に関する基礎実験, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.74, No.2, pp.265-270, 2018.
- 10) 松富英夫, 三上 輝, 千葉裕太: 氾濫水密度と波周期の津波荷重への影響, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.75, No.2, pp.397-402, 2019.
- 11) 中村友昭, 鈴木愛美, 水谷法美: 高濃度の浮遊砂を含有した流体の粘度の測定とその評価, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.71, No.2, pp.1185-1190, 2015.
- 12) 中村友昭, 鈴木愛美, 趙容桓, 水谷法美: 浮遊砂による流体の粘度の変化と一様流および津波による流動場に与える影響に関する研究, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.72, No.2, pp.163-168, 2016
- 13) 門廻充侍, 山下 啓, 高橋智幸, 今村文彦: 宮城県気仙沼市における震災データ活用による犠牲率と黒い津波外力との関係, *Coastal Engineering Journal* 投稿予定 (第 66 回海岸工学講演会 (2019) で発表).
- 14) NHK スペシャル連動企画“黒い津波”～知られざる実像～, <https://www3.nhk.or.jp/news/special/shinsai8portal/kuroinami/>, (参照 2019-12-9)

## 10.2. 水理試験手法の検討

### 10.2.1. 黒津波の発生条件

#### (1) 試験装置

##### 1) 試験水槽と地形模型

水路幅  $B$  の二次元長水槽を用いた、黒津波の発生条件に関する水理試験手法について、以下に検討する (図- 10.12 参照)。水槽の端部には、津波造波装置が設置し、これにより津波を造波する。

津波造波装置として、次のものを想定する。本装置は、チャンバー式の津波造波装置で、前面に水槽幅の開口部があり、それ以外は密閉された容器 (チャンバー) となっている。試験準備としてチャンバー内の空気を吸引し、水を吸い上げる。チャンバーの天井部分には、空気バルブが設置されており、造波時にはこれを解放することによりチャンバー内に空気が供給され、前面の開口部から水が吐き出され、津波を造波する。空気バルブは複数設置されており、これらの空気バルブの解放タイミングを制御することにより、任意の波形の津波を造波することが可能である。

図- 10.12 に、海底地形模型を示す。造波装置前面の水深は  $h$  とし、護岸前面水深  $h'$ 、長さ  $L$  の水平海底地形を、1/10 勾配で水槽底面に擦り付ける。この水平海底地形部には、長さ  $l$  × 幅  $B$  × 厚さ  $t$  の溝に底質模型を敷き詰める。陸上地形は傾斜角  $\theta$  とした一様斜面とする。なお、地形模型の表面は塩ビ製とする。

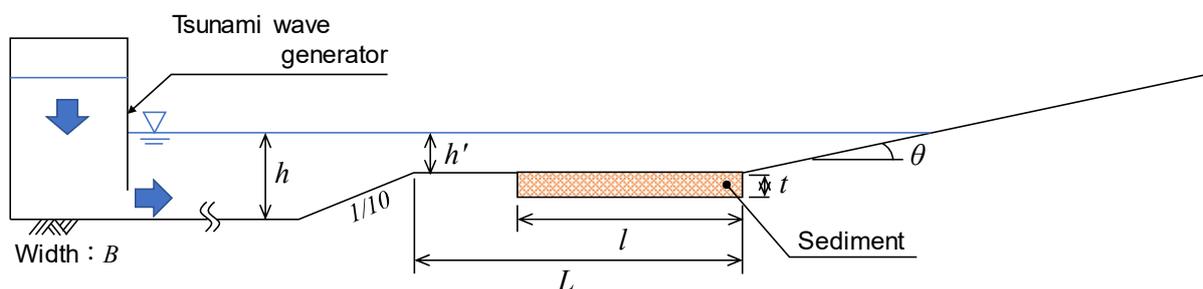


図- 10.12 黒津波の発生条件に関する試験装置(案)

##### 2) 底質模型

底質模型は微粉体を用いて模擬し、フルード相似則およびシールズ数に応じた粒子径、粒子密度の材料を選定する。底質模型の例を表- 10.4 に示す。表中には参考として、津波流速 3.0 m/s の場合での模型縮尺 (1/50, 1/100) に応じたシールズ数を示した。また比較として、実際に採取された底質を表- 10.5 に示す。津波流速 3.0 m/s, 粒子径  $6.74 \mu\text{m}$ , 粒子密度  $2.63 \text{ g/cm}^3$  とした場合のシールズ数は 87,626 である。

表- 10.4 黒津波の発生条件に関する試験に用いる底質模型の例

No.	材料名	粒子径 [ $\mu\text{m}$ ]	粒子密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	シールズ数 [-]	
				縮尺1/50	縮尺1/100
1	アクリル微粒子(1)	0.17	1.19	694819	347410
2	アクリル微粒子(2)	0.40	1.19	295298	147649
3	海洋性原料マリンシルト	7.00	—	—	—
4	シリカフェーム	0.20	2.10	88313	44157
5	フライアッシュ	0.30	2.60	40125	20063
6	石灰石微粉末(炭酸カルシウム)	0.70	2.70	16167	8083

表- 10.5 実際に採取された底質

No.	材料名	粒子径 [ $\mu\text{m}$ ]	粒子密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	備考
1	気仙沼の陸上採取試料(NHK)	6.74	—	水との混合密度 1.13 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
2	気仙沼の陸上堆積試料(環境省)	16~23	—	山下ら(2019) <sup>1)</sup> より出典
3	川崎港周辺の海底採取試料	16~114	—	山下ら(2019) <sup>1)</sup> より出典
4	参考文献：ヘドロ (海底採取)	110	2.63	佐藤ら(1995) <sup>2)</sup> より出典

## (2) 計測項目および計測方法

計測項目は、濁度測定による密度、動画撮影と画像解析による波形、水位、流速とする。

### 1) 濁度測定による密度計測

底質を巻き込んだ津波の濁度を測定することにより、底質を含んだ水の密度を推定する。なお、濁度は水中の微粒子の混入度を光の透過光量の変化として測定され、計器の測定部位置の高さを変えて鉛直分布の変化を時系列として捉える。また、密度への変換は、例えば底質の濃度を変化させた水に対してそれぞれ濁度を測定し、予め底質濃度と濁度の関係を把握しておくことで対応する。

### 2) 動画撮影と画像解析による波形

底質を巻き込んだ津波の波形変化を捉えるため、以下の2通りの手法で水路側面から撮影する。

- ・通常カメラによる試験全体の動画撮影
- ・高速カメラによる汀線付近の動画撮影

汀線付近から一様斜面上を遡上する状況は高速カメラにより撮影し、撮影スピードは1000 fps程度とする。動画とその他の計測結果は同期をとることで、密度や水位と比較できるようにする。

### 3) 水位、流速

水位・流速は、波検定時および津波による底質移動試験時において、容量式波高計・プロペラ式流速計により計測を行う。

### (3) 試験手順

#### 1) 波検定

津波による底質移動試験に用いる造波波形を決定するため、波検定を行う。津波造波装置としてチャンバー式（複数給気バルブ制御）を用いる場合、波検定では、複数の給気バルブの開放タイミングと、それぞれのバルブの開口面積を変更しながら、目的の波形状が造波出来るように試行錯誤的に繰り返し造波を行う。なお、造波波形を決定した後、同じ波形を3回程度繰り返して造波し、波高と流速を計測するとともに、再現性について確認する。また、底質模型設置部分を固定床とし、水位や流況の鉛直2次元分布の時間変化について計測する。

#### 2) 津波による底質移動試験

津波による底質移動試験では、波検定で決定した津波を発生させ、巻き込まれた底質を含む水の密度を濁度計により測定する。また、底質を巻込んだ津波の波形を高速カメラで撮影することで、その変化を捉える。なお、上記の密度は底質の敷詰め深さ  $t$  (図- 10.12 参照) を変化させることにより調整を行う。

## 10.2.2. 黒津波の作用荷重

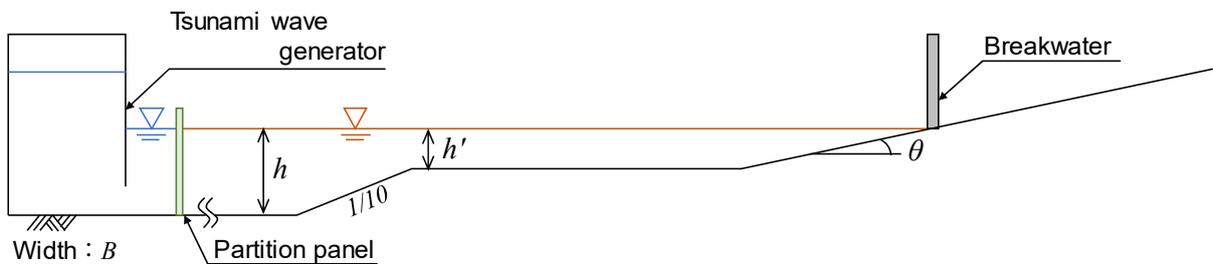
### (1) 試験装置

#### 1) 試験水槽と地形模型

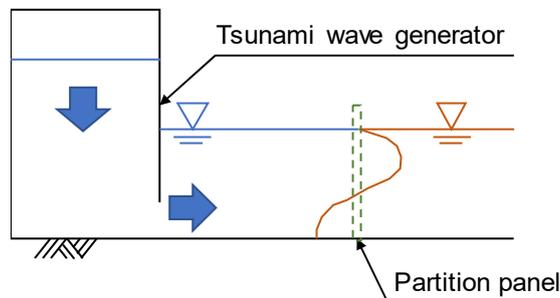
水路幅  $B$  の二次元長水槽を用いて、黒津波の作用荷重に関する水理試験を実施する手法について検討する（図- 10.13 (a)参照）。水槽の端部には、津波造波装置が設置し、津波を造波する。津波造波装置には、任意波形の造波が可能なが要求される。

海底地形の例を、図- 10.13 (a)に示す。造波装置前面の水深を  $h$  とし、護岸前面水深  $h'$ 、長さ  $L$  の水平海底地形を  $1/10$  程度の勾配で水槽底面に擦り付ける。陸上地形は傾斜角  $\theta$  とした一様斜面とする。なお、地形模型の表面は塩ビ製とする。

本試験では、水路の途中に仕切り板を設け、造波装置側には清水、海底模型側には底質を含んだ水を模擬した水溶液を入れ、津波造波時に仕切り板を取り除くことで底質を巻き込んだ津波を発生させる。これは、密度が異なる場合でも同じエネルギーの津波を発生させるための措置である。



(a) 試験水槽全体



(b) 造波装置付近

図- 10.13 黒津波の作用荷重に関する試験装置(案)

#### 2) 防潮堤模型

防潮堤模型を陸上部に設置し、津波による波力を測定するため、堤体に圧力計を鉛直方向に等間隔で取り付けける。

#### 3) 比重調整

比重の重い黒津波を模擬するため水溶液を用いる。溶質は密度調整が可能なものを選定する。表- 10.6 に、溶質の例を示す。

表- 10.6 黒津波の作用荷重に関する試験に用いる底質模型（溶質）の例

No.	材料名	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	水への溶解度 [g/水100g]*	備考
1	重曹：炭酸水素ナトリウム	2.2	9.6	弱アルカリ性，安全性が高い，入浴剤
2	融雪剤：塩化カルシウム	2.15	74.5	アルカリ性，溶解熱が発生，錆びる
3	食塩：塩化ナトリウム	2.16	35.89	中性，錆びる
4	炭酸ナトリウム	2.54	21.5	強アルカリ性(取扱注意)，水に溶けやすい
5	トレハロース	1.58	68.9	糖類

※水温20°C

## (2) 計測項目および計測方法

計測項目は，防潮堤に作用する波力・波圧，動画撮影と画像解析による波形，水位，流速とする。

### 1) 防潮堤に作用する波力・波圧

陸上部に設置した防潮堤の模型内に取り付けた圧力計により，津波が衝突した際の波力・波圧を測定する。

### 2) 動画撮影と画像解析による波形

底質を含んだ津波の波形変化を捉えるため，以下の2通りの手法で水路側面から撮影する。

- ・通常カメラによる試験全体の動画撮影
- ・高速カメラによる汀線付近の動画撮影

底質を含む津波が防潮堤に衝突する状況は高速カメラにより撮影し，撮影スピードは1000 fps程度とする。動画とその他の計測結果は同期をとることで，波力や水位と比較できるようにする。

### 3) 水位，流速

水位・流速は，波検定時および津波波力試験時において，容量式波高計・プロペラ式流速計により計測を行う。

### (3) 試験手順

#### 1) 波検定

津波波力試験に用いる造波波形は、黒津波の発生条件に関する試験にて実施した波検定の結果と同じものを用いる。任意波形を造波可能な津波造波装置を用いる必要がある。

#### 2) 津波波力試験

津波波力試験では、水路内の仕切り板を挟んで津波造波装置側には清水、海底模型側には密度を調整した水溶液を満たす。ゆっくりと仕切り板を取り除き、その後速やかに、波検定で決定した津波を発生・伝播させ、陸上部に設置した防潮堤に波が衝突した際の波力・波圧を測定する。また、津波波形を高速カメラで撮影することで、その変化を捉える。なお、底質を含む水の密度は水溶液の濃度を変化させることにより調整を行う。

### 10.2.3. 解析モデルの確認

#### (1) 試験装置

##### 1) 試験水槽と地形模型

黒津波の解析モデルの検証には、平面水槽を用いた水理試験が望ましい（図- 10.14 参照）。水槽の端部に津波造波装置を設置し、津波を造波するが、上記試験と同様、任意波形を造波出来る津波造波装置であることが必要である。

水理試験に適用する地形の例を、図- 10.14 に示す。港湾を模擬した堤防模型を設置し、護岸前面水深  $h'$  の一様水深とする。港湾の出入口には、長さ  $l$  × 幅  $B$  × 厚さ  $t$  の溝を設けて底質を敷き詰める。陸上地形は汀線に沿って防潮堤を設置する場合も考慮する。

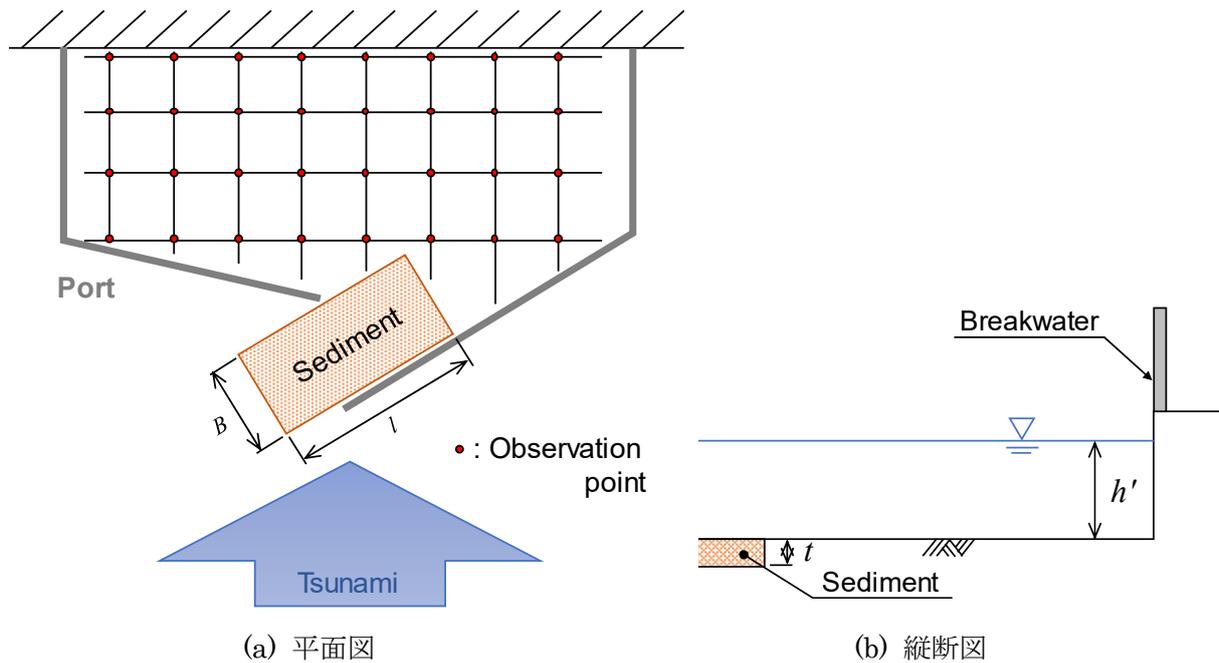


図- 10.14 解析モデルの確認に関する試験装置(案)

##### 2) 底質模型

底質模型は微粉体を用いて模擬し、フルード相似則およびシーolz数に応じた粒子径、粒子密度の材料を選定する（前述の表- 10.4 参照）。

## (2) 計測項目および計測方法

計測項目は、港湾内における底質の堆積量、水位、流速とする。

### 1) 港湾内における底質の堆積量

伝播してきた津波が港湾の出入口にくると縮流が発生し、流速が早くなるために底質が巻き上がりやすくなる。津波が収まった後、港湾内に流れた底質の堆積量を、ポイントゲージ等を用いてマス目上に計測することで、堆積した底質の平面分布を把握する。

### 2) 水位、流速

水位・流速は、波検定時および津波による底質移動試験時において、容量式波高計・プロペラ式流速計により計測を行う。

## (3) 試験手順

### 1) 波検定

津波による底質移動試験に用いる造波波形を決定するため、波検定を行う。波検定の際には、底質模型は設置せずに固定床とする。造波波形を決定した後、同じ波形を3回程度繰り返して造波し、波高と流速を計測するとともに、再現性について確認する。また、港湾模型内の平面2次元流況、港口周辺の3次元詳細流況等を計測する。

### 2) 津波による底質移動試験

津波による底質移動試験では、波検定で決定した津波を発生させ、港湾の出入口に敷き均した底質を巻き上げ、港湾内に堆積させる。このときの港湾内における底質の堆積量をポイントゲージ等によりマス目状に計測する。なお、上記の密度は底質の敷詰め深さ  $t$  (図-10.14 参照) を変化させることにより調整を行う。

## 参考文献

- 1) 山下 啓, 大石裕介, 古村孝志, 今村文彦: 臨海都市部における津波による底質移動に起因した災害リスク評価に向けて, *Coastal Engineering Journal* 投稿予定 (第66回海岸工学講演会 (2019) で発表)。
- 2) 佐藤大輔, 平木智明, 遠藤郁夫, 桃井徹: 堆積底泥 (ヘドロ) の固化処理に関する実験的研究, *土木学会年次学術講演会講演概要集*, 50巻, 第2部門B, pp.904-905, 1995。

## 11. まとめ

本事業では、浮遊状態にある船舶が津波により漂流物として防潮堤に衝突する事象を取り上げ、水理試験によりその衝突特性について検討した。水理試験により得られた結果を以下にまとめる。

### 衝突頻度

- ✓ 浅水域を伝播する津波の波速は、津波高を考慮した水深に対する浅水理論の波速にほぼ一致する。
- ✓ 汀線に近付き砕波して段波状になった津波の波速は、段波理論の波速により保守的に評価可能である。
- ✓ 波に連行された漂流物の移動速度は波速に等しく、汀線付近に設置された防潮堤に衝突する衝突速度は、この波速もしくはこれよりも若干小さい。
- ✓ 漂流物の衝突頻度は、汀線から遠くなるにしたがって、離岸距離に対し線形的に低下する。
- ✓ 一方、漂流した際の衝突速度は、漂流物の初期位置によらない。これは、衝突速度が波速にほぼ一致することに起因する。
- ✓ 漂流物が衝突する範囲は、砕波点から概略津波高の 5 倍程度離れた地点よりも岸側に位置する場合に限られる。ただし、漂流物長さが十分に長い場合はこの限りではない。本試験の範囲では、漂流物長さが津波高さよりも長い場合に、砕波点を越える沖側が初期位置であっても衝突する場合がある。
- ✓ 初期位置が砕波点よりも沖側の場合、水面勾配が概略 1 を超えると、漂流物が波に連行される。ただし、砕波点を越えるには、上述したように漂流物長が十分長い場合に限られる。
- ✓ 砕波点より内側の場合、漂流物の幅が大きい方が押し出す流体力が大きくなるため衝突頻度が高くなる。一方砕波帯よりも沖側では、漂流物長が長いほど、波に連行される頻度は高くなる。

✓

### 衝突力

- ✓ 気中衝突試験によれば、ある高さより高い位置に衝突した場合、堤体に生じる曲げひずみエネルギーは、衝突高さによらず一定となっている。衝突位置が底面に近付くと曲げひずみエネルギーは減少しているが、せん断ひずみエネルギーへの伝達率は増加することから、漂流物の衝突により堤体に伝達されるエネルギーは、衝突高さによらず一定と考えられる。
- ✓ 衝突高さは、漂流物の質量が小さいほど低い位置になる傾向にあるが、保守的には反射波を含まない水位（通過波水位）で評価することが出来る。
- ✓ 衝突時の漂流物の持つ運動エネルギーに対する堤体のひずみエネルギーの比は、漂流物の剛性が高く、質量が大きい場合にはほぼ一定となる。一方、漂流物の剛性が低い場合や質量が小さい場合には、エネルギー伝達率は速度が小さいほど低くなる。
- ✓ 漂流物の衝突頻度は汀線から遠くなるにしたがって線形的に低下するのに対し、衝突速度は初期位置の影響を受けないため、衝突力は初期位置によって変わらない。
- ✓ 初期位置と衝突力の関係では、初期位置が衝突頻度 30%以下となるような遠い場合に、衝突力は小さくなっている。これは、衝突頻度が下がると、堤体に対して直角に衝突する事

象の発生する頻度も低下するため、最大衝突力が発生する確率が低下して見かけ上衝突力が小さくなっているものと考えられる。初期位置に関わらず直角に衝突する事象は起こりうるため、最大衝突力は初期位置によって変わらないと考えるのが妥当である。

- ✓ 衝突力の評価式を提案し、本試験を再現するパラメタについて算出した。ただしこのパラメタは、漂流物や堤体の物性や重さにより異なるため、一般的な値の導出についてはさらに検討が必要である。
- ✓ 提案式によると、衝突力は運動量に比例する、すなわち衝突速度の1乗に比例する。ただし、漂流物の剛性や質量によっては、エネルギー伝達率が速度によって変わるため、衝突速度の次数はこれよりも多少大きくなると考えられる。
- ✓ 提案式を既往の評価式と比較することにより、各評価式の妥当性を検証した。これらのうち、水谷らの式が本試験をもっとも適切に評価している。ただし水谷の式は、衝突時間がパラメタに含まれるため、実務への適用には課題が残る。また、池野らの式も比較的精度よく試験結果を再現しているが、衝突速度への依存度が高く、衝突速度が大きい場合（概略2~3 m/s以上）では過大評価となる。
- ✓ 松富の式と有川の式は、本検討では過大評価となったが、剛性に関わるパラメタを適切に設定すれば、衝突速度に対し広い範囲で適切な評価値を与えるものと考えられる。
- ✓ FEMAの式についても同様、漂流物および堤体の軸剛性を適切に設定することにより評価の精度が向上すると考えられるが、本検討においてはもっとも過大となった。
- ✓ 漂流物衝突力評価に係る体系的な考え方について取り纏め、漂流物の衝突は、主に初期位置が砕波点よりも岸側の場合に発生し、衝突した場合の衝突力は、漂流物の初期位置によらず、漂流物質量、質量係数、剛性および衝突速度によって表されることを示した。また既往の評価式のうち、FEMAの式、有川らの式、松富の式が、剛性を適切に設定することにより、衝突速度によらず衝突力を適切に評価可能であることを示した。

✓

#### 数値シミュレーション

- ✓ VOF法とSPH法による数値解析により、漂流物の衝突シミュレーションを実施した。
- ✓ VOF法では、漂流の開始が水理試験に比較して遅れる傾向にある。衝突するケースでも津波到達から衝突までの時間が0.5s程度の長い傾向にあり、水理試験結果よりも衝突し難くなっている。漂流物の動き出す際の流体力を抗力係数により求める場合は漂流物周辺の流速が再現出来ていればよいが、波に連行される場合、漂流物の前後の水位差による流体力が影響する。この局所的な水位の解析精度が、要因の1つと考えられる。
- ✓ SPH法の場合は、漂流物の動き出しはVOF法よりも早く、衝突する確率も高くなっている。ただし、漂流物が水面に潜り込む現象の再現性に課題があり、漂流物が実際の試験結果よりも浮いている傾向にある。このため、水理試験の結果よりも衝突率が高くなる傾向にある。
- ✓ いずれのケースも、漂流物や堤体の剛性まで再現することは困難であり、衝突直前の衝突速度をシミュレーションにより求め、衝突力の評価式や構造解析シミュレーションにより衝突力を別途算出する方法が現状では現実的と考えられる。

## 黒津波

- ✓ 黒津波に関する既往文献を調査した。直接、黒津波を対象とした既往研究はわずかであり、そのほとんどが土砂移動を対象としたものである。土砂移動と黒津波では、共通点はあるものの、沈降速度や粘性等、物性の異なる現象と考えられるため、今後の検討が必要である。
- ✓ 黒津波の発生条件および黒津波の津波波力を検討するための水理試験方法について検討し、提案した。黒津波を再現するための試験模型（粒子等）の選択が課題であり、いくつかの候補を調査して提示した。





**リサイクル適性 (A)**

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。